



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Model d'una línia fortament no linial per les ones de sorra en una platja

Treball realitzat per:

Marcos Šimić Sans

Dirigit per:

Albert Falqués Serra

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, **21-Set-2015**

Departament de Física Aplicada

TREBALL FINAL DE GRAU

Agradecimientos

Quisiera dedicar este trabajo a todos aquellos que me han animado y respaldado durante su elaboración.

También quisiera expresar mi más sentido agradecimiento a aquellos profesores de la Universidad Politécnica de Catalunya que me han dedicado minutos de su tiempo para resolver dudas, aclarar conceptos o simplemente conversar sobre el tema de este trabajo; en especial, a mi tutor Albert Falqués.

A todos, gracias.

- Marcos -

Summary – Resumen

This document will cover the development of *ShorePlot*, a computer program able to obtain the position of a shoreline according to the qualities and parameters of the beach (both wave and sediment wise). In order to do so, a one-line model will be employed, and the obtained results will be compared following the application of different approaches (Snell's Law and Q2D-morpho model) as well as with different shore conditions.

Additional information provided by the software will be also covered, such as the evolution of wave propagation in space and time, as well as the advantages and limitations of each propagation method.

Finally, a brief explanation will be included covering the internal functions of *ShorePlot*, detailing the treatment of the incoming variables and the whole process with them in order to obtain the final results.

A lo largo de este documento se describirá el desarrollo de *ShorePlot*, un programa informático capaz de estimar la posición de una línea de costa en función de los diferentes parámetros de la playa (oleaje y sedimento). Para esto, se empleará un modelo de una línea y se compararán los resultados obtenidos aplicando diferentes enfoques (Ley de Snell y modelo Q2D-morfo) y en distintas situaciones de la costa.

Se cubrirá también la información adicional proporcionada por el programa, tal como la evolución de las olas propagadas en espacio y tiempo, así como las ventajas y limitaciones de cada método de propagación y/o hipótesis.

Por último, se hará también una breve explicación del funcionamiento interno de *ShorePlot*, incluyendo el tratamiento de las variables de entrada y el proceso efectuado para obtener las variables de salida y los resultados.

Índice

1. Introducción y objetivos.....	6
2. Teorías e hipótesis	7
2.1. Teorías	7
2.1.1 Transporte de sedimentos: Modelo de una línea.....	7
2.1.1.1. Límites laterales	11
2.1.1.1.1. Extremos periódicos	11
2.1.1.1.2. Extremos amortiguados	11
2.1.1.2. Estructuras	13
2.1.2. Propagación del oleaje	15
2.1.2.1. Modelo basado en la Ley de Snell	16
2.1.2.2. Modelo Q2D-morfo	19
2.2. Hipótesis	21
2.2.1. Extensión y precisión	21
2.2.2. Profundidad: Perfil de Dean.....	23
3. Programación	26
3.1. Soporte	26
3.1.1. Elección del lenguaje	26
3.1.2. Características de Fortran95	28
3.2. Estructura interna del programa.....	29
3.2.1. Funciones y variables.....	30
3.2.2. Flujo de trabajo	32
3.2.3. Representación visual	35
4. Manual de funcionamiento.....	36
4.1. Sobre <i>ShorePlot</i>	36
4.2. Interfaz de usuario	37
5. Análisis de resultados.....	47
5.1. Confluencia de modelos	47
5.2. Espigón	49
5.2.1. Ensayo de espigón, $\theta_0=15^\circ$ (1)	50
5.2.2. Ensayo de espigón, $\theta_0=15^\circ$ (2)	51
5.2.3. Ensayo de espigón, $\theta_0=40^\circ$ (1)	52

5.2.4. Ensayo de espigón, $\theta_0=40^\circ$ (2)	54
5.2.5. Ensayo de espigón, $\theta_0=60^\circ$ (1)	56
5.2.6. Ensayo de espigón, $\theta_0=60^\circ$ (2)	57
5.2.7. Ensayo de espigón, $\theta_0=80^\circ$	59
5.3. “Nourishment” (Relleno de playa)	60
5.3.1. Ensayo “ <i>Nourishment</i> ”, $\theta_0=0^\circ$	61
5.3.2. Ensayo “ <i>Nourishment</i> ”, $\theta_0=30^\circ$	62
5.3.3. Ensayo “ <i>Nourishment</i> ”, $\theta_0=60^\circ$	64
5.3.4. Ensayo “ <i>Nourishment</i> ”, $\theta_0=80^\circ$	65
6. Conclusiones	67
7. Ilustraciones	69
8. Referencias bibliográficas	72

1. Introducción y objetivos

El principal objetivo de este trabajo consiste en el desarrollo de un software informático capaz de modelizar y representar la evolución de una playa de arena en función de las diferentes condiciones ambientales.

Para ello, y con el fin de enriquecer el estudio, se aproxima el problema de la propagación del oleaje desde el enfoque de dos teorías diferentes: la Ley de Snell y el modelo Q2D-morfo.

En ambos casos se ha elaborado un modelo de representación de una línea, que deberá entenderse como la línea de costa, y se efectúan diferentes ensayos para comprobar las diferencias entre los distintos enfoques.

El software ha sido diseñado con varias metas en mente: en primer lugar, se ha tratado de lograr una apariencia sencilla e intuitiva, que permitiera al usuario acceder al programa y comprender los diferentes menús y resultados sin necesidad expresa de consultar el manual. Sin embargo, se ha hecho también hincapié en lograr un programa robusto y plenamente funcional.

Se incluyen en este informe los detalles teóricos sobre los que se basa el programa, una breve explicación del lenguaje de programación y el soporte que han servido para su desarrollo, un manual de funcionamiento para el usuario y un análisis de resultados que compara distintas situaciones y contrasta ambos enfoques teóricos.

Así pues, el alcance de este proyecto queda dividido en dos frentes: el desarrollo de dicho software, en adelante referido como *ShorePlot*, y el posterior análisis efectuado en el presente documento.

2. Teorías e hipótesis

Este primer capítulo se centrará en describir el aspecto teórico del trabajo.

En primer lugar se detallarán los aspectos más relevantes en la determinación de la línea de costa y, a continuación, se explicarán con detalle los fundamentos de ambos enfoques empleados para resolver el problema de la propagación del oleaje.

Finalmente, se indicarán y describirán las diferentes hipótesis y consideraciones que se han llevado a cabo para la elaboración del software.

2.1. Teorías

Los postulados teóricos que definen el proceso de determinación de la línea de costa quedan bien diferenciados en dos ámbitos; el primero referido a la ecuación de transporte de sedimentos y, el segundo, a la propagación del oleaje. En el primer campo se explicarán también las consideraciones tenidas en cuenta para hacer posible la inclusión de espigones en la playa de estudio.

2.1.1 Transporte de sedimentos: Modelo de una línea

El modelo empleado para la solución del problema del transporte de sedimentos está basado en la siguiente expresión, que determina el valor local del caudal longitudinal de sedimento en función de una serie de parámetros:

$$Q_i = \mu \cdot H_b^{5/2} \cdot \sin(2 \cdot (\theta_b - \varphi_i))$$

Ec. 2.1.1-I: Caudal de sedimento. Fuente [1], pág. 331

Donde:

$$\mu = \frac{K \cdot \rho_w \cdot \sqrt{g/\gamma_b}}{16 \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot (1 - p)}$$

Ec. 2.1.1-II: Coeficiente μ del caudal de sedimento. Fuente [1], pág. 331

Cuyos parámetros representan los siguientes valores:

K : Constante adimensional

ρ_w : Densidad del agua

ρ_s : Densidad del sedimento

p : Valor de porosidad del sedimento (entre 0 y 1)

γ_b : Índice de rotura

g : Aceleración de la gravedad

H_b y θ_b hacen referencia, respectivamente, a los valores de la altura de ola y el ángulo del oleaje incidente en el momento de la rotura; su determinación vendrá explicada en apartados posteriores.

El valor φ debe entenderse como el ángulo de la inclinación de la costa respecto a los ejes globales, de modo que $(\theta_b - \varphi)$ represente el ángulo relativo de las olas incidentes respecto a dicha línea de costa. Con ello, se define φ como:

$$\varphi_i = \text{atan}\left(\frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2 \cdot \Delta x}\right)$$

Ec. 2.1.1-III: Ángulo de inclinación local de la costa. Fuente [1], pág. 331

Donde ' y_i ' se entiende como la posición de la línea de costa en el nodo 'i-ésimo' de la malla de cálculo. Para más información sobre este tema, consultar el apartado **2.2.1. Extensión y precisión**.

A continuación, y una vez determinados los valores de Q para la posición de la costa inicial, se plantea la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{1}{D} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x}$$

Ec. 2.1.1-IV: Ecuación de continuidad. Fuente [1], pág. 332

Donde el valor D representa la profundidad de rotura, o en el punto a partir del cual se considera nulo el transporte transversal de sedimento. Dicho de otra forma, representa la profundidad en el punto en que dicha profundidad deja de verse afectada por los cambios estacionales.

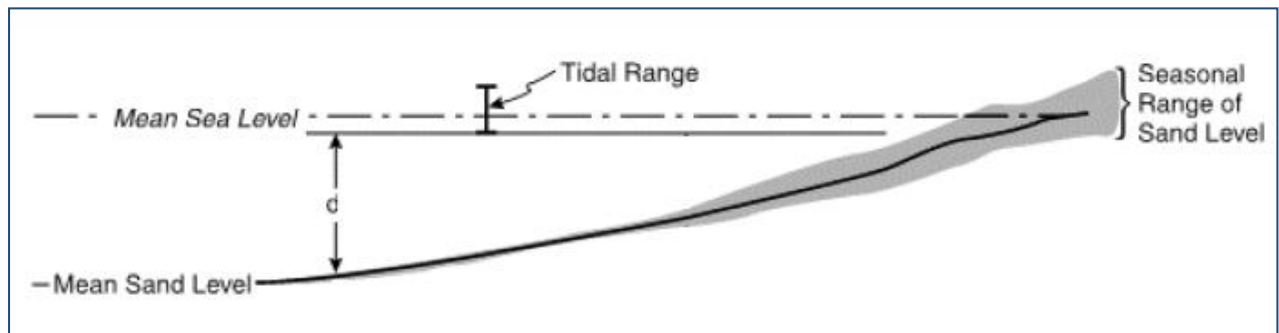


Fig. 2.1.1-a: Profundidad de rotura. Fuente [2]

En este estudio se ha solucionado el problema por la vía explícita, que resulta más directo y sencillo, con lo cual podría plantearse la ecuación anterior de la siguiente forma:

$$\frac{y_i^{n+1} - y_i^n}{\Delta t} = -\frac{1}{D} \cdot \frac{Q_{i+1}^{n+1} - Q_{i-1}^{n+1}}{2 \cdot \Delta x}$$

Ec. 2.1.1-V: Ecuación de continuidad.

Que, a su vez, podría reordenarse de la forma:

$$y_i^{n+1} = y_i^n - \frac{\Delta t}{D} \cdot \frac{Q_{i+1}^{n+1} - Q_{i-1}^{n+1}}{2 \cdot \Delta x}$$

Ec. 2.1.1-VI: Ecuación de continuidad. Fuente [1], pág. 332

Con esta última expresión se obtiene un modo de determinar la posición de la línea de costa en función del caudal de sedimento. No se debe olvidar, sin embargo, que el modo de obtener dicho caudal pasa por la determinación previa de la línea de costa en el instante inmediatamente anterior. Esto convierte ambos valores en variables interdependientes, que deberán ser determinadas de manera alternada durante la resolución del problema.

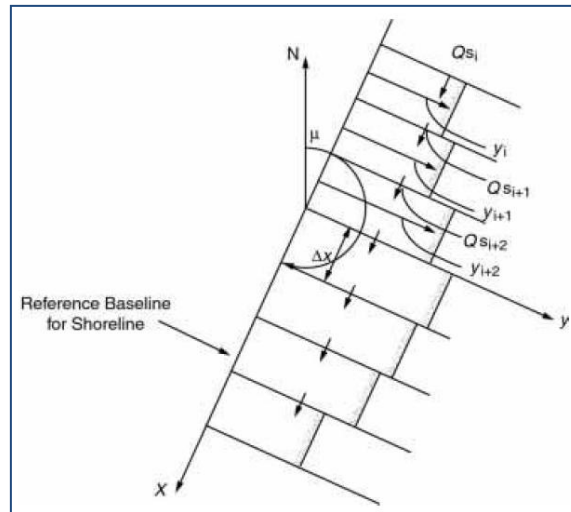


Fig. 2.1.1-b: Diagrama esquemático del modelo. Fuente [1], pág. 331

Adicionalmente, y debido a la resolución explícita del problema, aparece una condición de estabilidad que limita el valor de Δt . Dicha limitación recibe el nombre de condición de Courant-Friedrichs-Lewy, y viene detallada en el apartado “2.2.1. Extensión y precisión”.

2.1.1.1. Límites laterales

Determinadas las expresiones anteriores, aparece la necesidad de establecer unas condiciones de contorno en los límites de la malla de cálculo.

Debe entenderse como condiciones de contorno la determinación del comportamiento de los extremos laterales de la costa de estudio. De lo contrario, los valores de 'y' y 'Q' en dichos extremos quedarían sin solución, ya que $y_i = f(Q_{i+1}, Q_{i-1})$ y $\varphi_i = f(y_{i+1}, y_{i-1})$.

En cuanto a *ShorePlot*, el software se ha desarrollado con la posibilidad de elegir entre dos alternativas:

2.1.1.1.1. Extremos periódicos

Se plantea la playa de estudio como una instancia entre una infinidad de repeticiones contiguas.

La posición de la línea de costa en ambos extremos laterales es idéntica por definición; y ambos puntos presentan idéntico valor de caudal de sedimento en todos los instantes de tiempo.

Esta solución resuelve el problema de la determinación de $y_i(Q_{i+1}, Q_{i-1})$ y de $\varphi_i(y_{i+1}, y_{i-1})$ en los extremos puesto que, en el momento en que el modelo alcanza el final de la malla, se comporta tomando de nuevo los valores del principio. De este modo, se simula una costa eternamente periódica.

2.1.1.1.2. Extremos amortiguados

Se plantea la playa de estudio como una instancia aislada en una costa uniforme.

En este caso, se impone una tendencia exponencial a partir de los extremos para alcanzar un valor estable. Sin embargo, y puesto que la malla no es capaz de representar toda esta extensión (ni constituye información de interés), se generan virtualmente los valores exclusivamente necesarios para determinar los extremos.

Así pues, en el extremo derecho de la malla ($x=Lx$), la expresión que determinaría 'y' en su tendencia al equilibrio sería la siguiente:

$$\frac{\partial(y_E - y_F)}{\partial x} = \lambda^{-1} \cdot (y_E - y_F)$$

Ec. 2.1.1.1.2-I: Amoriguación de la costa, extremo derecho. Fuente [3], pág. 23

Siendo λ la distancia en que se alcanza dicho equilibrio; y_F el valor de ‘y’ en el extremo derecho e y_E el valor de equilibrio.

Esta ecuación puede discretizarse de la siguiente manera, dando lugar al valor y_{F+1} , que no representa un valor de la malla, pero sirve para obtener el resultado de $\varphi_F(y_{F+1}, y_{F-1})$ y, en consecuencia, de ‘Q’:

$$\frac{y_{F+1} - y_{F-1}}{2 \cdot \Delta x} = \frac{y_E - y_F}{\lambda}$$

$$y_{F+1} = y_{F-1} + \frac{2 \cdot \Delta x}{\lambda} \cdot (y_E - y_F)$$

Ec. 2.1.1.1.2-II: Amoriguación de la costa, extremo derecho.

De forma análoga, se procede para el extremo inicial (izquierdo) de la malla; aunque la expresión inicial quedaría de la siguiente forma:

$$\frac{\partial(y_0 - y_E)}{\partial x} = \lambda^{-1} \cdot (y_0 - y_E)$$

Ec. 2.1.1.1.2-III: Amoriguación de la costa, extremo izquierdo. Fuente [3], pág. 24

Como nota adicional, a efectos de este estudio se ha fijado el valor de λ en dos veces la longitud de la costa ($2 \cdot L_X$).

2.1.1.2. Estructuras

Uno de los puntos de interés en la realización de este estudio es el comportamiento de la costa en presencia espigones. Estas estructuras interrumpen el flujo normal de sedimento a lo largo de la playa y generan erosión y acreción, según el ángulo de incidencia del oleaje.

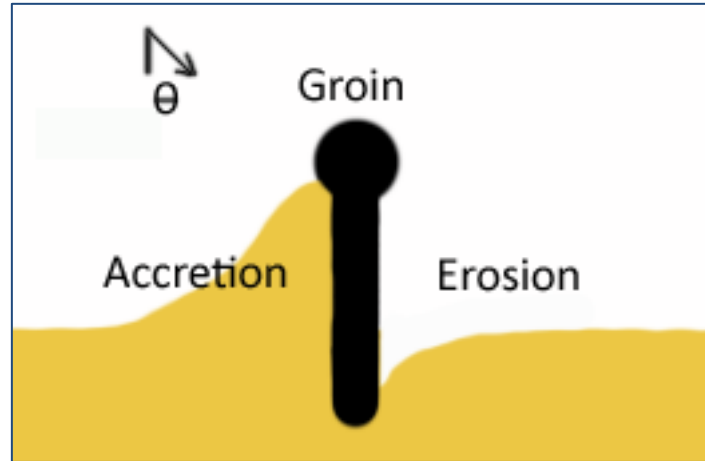


Fig. 2.1.1.2-a: Esquema de funcionamiento de un espigón

Para poder representar este fenómeno, se han debido tener en cuenta una serie de consideraciones.

En primer lugar, el punto inmediatamente posterior a la presencia de un espigón (en el sentido del oleaje) no contemplará el valor de la posición de la línea de costa en puntos anteriores a la presencia de dicho espigón. Esto debe ser así ya que, de lo contrario, se estaría considerando un ángulo φ desorbitado y que falsearía los resultados en la vecindad de la estructura. En estos puntos, se aproxima este valor mediante la expresión:

$$\varphi_i = \text{atan}\left(\frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x}\right)$$

Ec. 2.1.1.2-I: Orientación de la costa tras espigón, oleaje en sentido Este.

ó:

$$\varphi_i = \text{atan}\left(\frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta x}\right)$$

Ec. 2.1.1.2-II: Orientación de la costa tras espigón, oleaje en sentido Oeste.

Un fenómeno similar aparece en el punto inmediatamente anterior a la presencia de un espigón (de nuevo en el sentido del oleaje). Como es evidente, la posición de la línea de costa en el lado con acrecencia no puede depender en absoluto del caudal de sedimento que presenta la zona con erosión. De este modo:

$$y_i^{n+1} = y_i^n - \frac{\Delta t}{D} \cdot \frac{Q_i^{n+1} - Q_{i-1}^{n+1}}{\Delta x}$$

Ec. 2.1.1.2-III: Posición de la costa antes de un espigón, oleaje en sentido Este.

$$y_i^{n+1} = y_i^n - \frac{\Delta t}{D} \cdot \frac{Q_{i+1}^{n+1} - Q_i^{n+1}}{\Delta x}$$

Ec. 2.1.1.2-IV: Posición de la costa antes de un espigón, oleaje en sentido Oeste.

Por último, se ha hecho una consideración sobre la retención del sedimento que provoca la estructura.

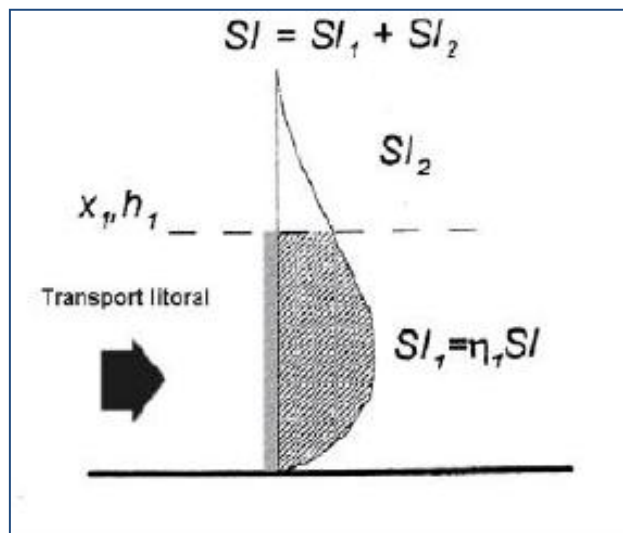


Fig. 2.1.1.2-b: Esquema conceptual del fenómeno del Bypass. Fuente [4]

Según la teoría de Bailard (1985), el transporte litoral de sedimento no se produce de forma homogénea en el espacio, sino siguiendo una distribución determinada. De este

modo, y como ilustra la figura 2.1.1.2-b, incluso en presencia de un espigón puede existir cierto transporte de sedimentos.

Aparece pues el concepto de ‘Índice de Rebase’ o ‘Bypass Ratio’.

Este parámetro define qué proporción del caudal de sedimento pasa y cuál queda retenida tras la estructura, y toma la forma de la siguiente expresión:

$$BYP = 1 - \frac{D_G}{D_b}$$

Ec. 2.1.1.2-V: Bypass Ratio. Fuente [4]

Donde D_G representa la profundidad en la cabeza del espigón y D_b la profundidad a la que rompen las olas.

El parámetro BYP queda pues comprendido entre 0 y 1; resultando mínimo mientras las olas rompan entre el espigón y la línea de costa, y máximo en el momento que el espigón se vea rebasado por la arena (haciendo esencialmente que D_G valga cero).

Este índice modulará el caudal de sedimento ‘Q’ en presencia de espigones y regulará la función retentiva de éstos.

2.1.2. Propagación del oleaje

Tal como se ha visto en la ecuación de transporte de sedimentos (Ec. 2.1.1-I), para obtener la evolución de la línea de costa es esencial la determinación de los parámetros de rotura del oleaje; en concreto, de la altura de ola H_b y del ángulo de incidencia θ_b en dicho punto de rotura.

En este estudio se enfocará la obtención de estos resultados según dos alternativas bien diferenciadas: Un modelo simplificado basado en la Ley de Snell y el modelo Q2D-morfo. Ambos obtienen el campo de alturas de ola y de ángulos de incidencia, y determinan H_b y θ_b en el momento en que se cumple:

$$\gamma_b = \frac{H}{D}$$

Ec. 2.1.2-I: Condición de rotura del oleaje. Fuente [11]

2.1.2.1. Modelo basado en la Ley de Snell

Conocida a menudo como la *Ley de la refracción*, la Ley de Snell es empleada de forma habitual en los cálculos aproximados en ingeniería marítima.

Este método parte de la premisa de que:

$$H_2 = K_s \cdot K_r \cdot H_1$$

Ec. 2.1.2.1-I: Propagación del oleaje. Fuente [12]. Pág. 4

Siendo H_2 la altura del oleaje en un hipotético punto 2, respecto a la altura conocida en el punto 1. Los coeficientes K_s y K_r corresponden, respectivamente, al fenómeno de *Shoaling* y al de Refracción.

Así pues, K_s queda definido como:

$$K_s = \sqrt{\frac{c_{g1}}{c_{g2}}}$$

Ec. 2.1.2.1-II: Coeficiente de *Shoaling*. Fuente [12]. Pág. 4

Donde c_g se corresponde con la llamada “celeridad de grupo”.

Por otro lado, el coeficiente de refracción K_r se define de la siguiente manera:

$$K_r = \sqrt{\frac{B_1}{B_2}}$$

Ec. 2.1.2.1-III: Coeficiente de Refracción. Fuente [12]. Pág. 4

Donde B representa la distancia entre las líneas ortogonales que inciden en la costa (representando trenes de ola). La dificultad radica en que, para obtener dichos valores, habitualmente harían falta métodos de representación gráfica.

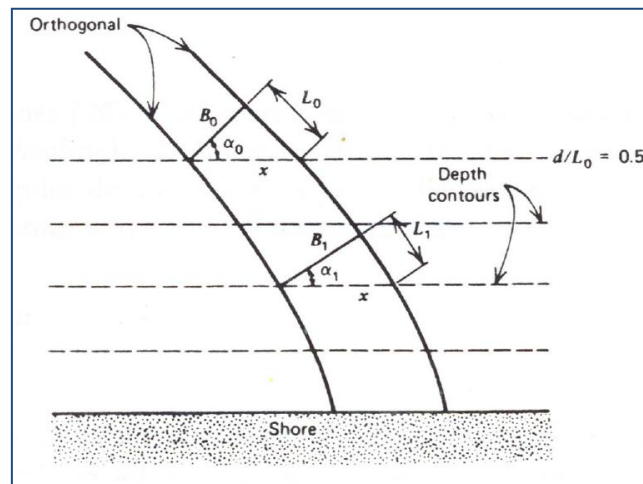


Fig. 2.1.2.1-a: Esquema para calcular el coeficiente de difracción. Fuente [12], pág 5

Sin embargo, bajo la presunción de una costa rectilínea y con batimetría recta y perfectamente paralela, se hace posible determinar los valores de B .

Siguiendo el esquema de la figura, se obtiene que:

$$\frac{B_0}{B_1} = \frac{\cos(\alpha_0)}{\cos(\alpha_1)}$$

Ec. 2.1.2.1-IV: Obtención de B . Fuente [12], pág. 6

Puesto que α_0 acostumbra a ser el ángulo inicial de incidencia del oleaje, el problema se presenta con la determinación de α_1 .

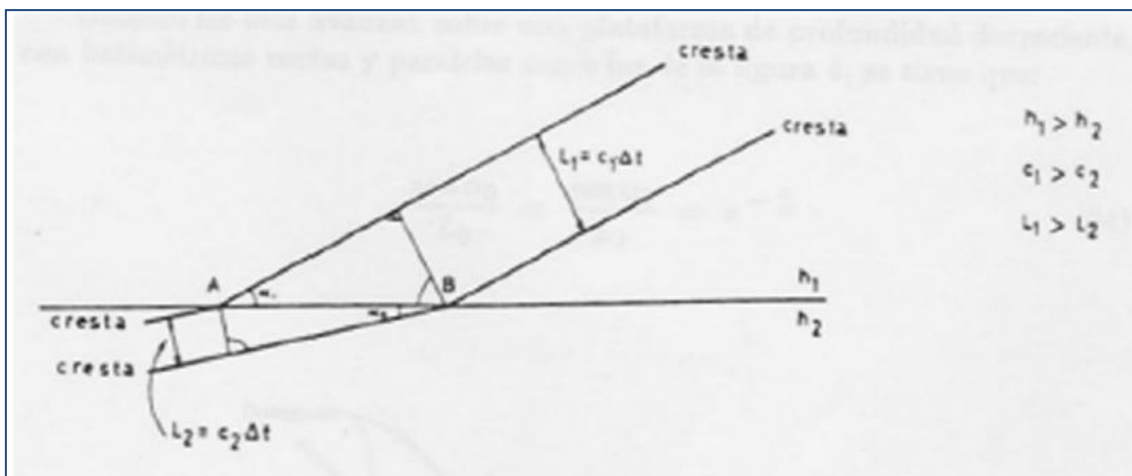


Fig. 2.1.2.1-b: Cambio de dirección del frente de olas al variar la profundidad. Fuente [12], pág 6

Es en este punto, puesto que el período T es constante, cuando entra en juego la Ley de Snell; dando lugar a la siguiente relación:

$$\sin(\alpha_2) = \frac{L_2}{L_0} \cdot \sin(\alpha_0)$$

Ec. 2.1.2.1-V: Obtención de α_2 . Fuente [12], pág. 7

De manera evidente, el ángulo de incidencia queda determinado como:

$$\alpha_2 = \text{asin}\left(\frac{L_2}{L_0} \cdot \sin(\alpha_0)\right)$$

Ec. 2.1.2.1-VI: Obtención de α_2 .

De este modo, puede obtenerse la altura del oleaje en cualquier punto según la expresión:

$$H_2 = \sqrt{\frac{c_{g0}}{c_{g2}}} \cdot \sqrt{\frac{\cos(\alpha_0)}{\cos(\text{asin}(\frac{L_2}{L_0} \cdot \sin(\alpha_0)))}} \cdot H_0$$

Ec. 2.1.2.1-VII: Propagación del oleaje.

Debe destacarse que la premisa principal de este método es la total rectitud y paralelismo de línea de costa y batimetría.

En este estudio, sin embargo, este método será empleado de manera local, punto a punto, para intentar definir situaciones que se alejan enormemente de esta premisa. De este modo, las propiedades del oleaje obtenido por este método no tendrán en cuenta las propiedades de los puntos adyacentes.

El objetivo reside en comparar los resultados obtenidos con aquellos que proporcione el modelo Q2D-morfo, que sí contempla este tipo de situaciones.

2.1.2.2. Modelo Q2D-morfo

Este modelo morfodinámico, publicado por A. Falqués en 2006, constituye un medio de cálculo de la evolución de la costa a medio-largo plazo.

Puesto que considera la coordenada transversal en la determinación de la línea de costa, podría considerarse como un método a medio camino entre los modelos tradicionales de una línea y los modelos morfodinámicos de área.

El modelo desarrollado para *ShorePlot* está basado en la primera versión publicada de este estudio y parte de las siguientes expresiones:

$$\omega^2 = gk \tanh(kD)$$

Ec. 2.1.2.2-I: Relación de dispersión. Fuente [3], pág. 9

$$\frac{\partial k_y}{\partial x} = \frac{\partial k_x}{\partial y}$$

Ec. 2.1.2.2-II: Ecuación de fase. Fuente [3], pág. 9

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(c_g H^2 \frac{k_x}{k} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(c_g H^2 \frac{k_y}{k} \right) = 0$$

Ec. 2.1.2.2-III: Ecuación de conservación de energía. Fuente [3], pág. 9

Donde ω representa la frecuencia angular; g la aceleración de la gravedad; $k = (k_x, k_y) = k(-\cos \theta, \sin \theta)$ representa el vector número de onda, y c_g la velocidad de grupo.

Con estas tres expresiones se crea un sistema desacoplado a solucionar de la siguiente manera:

En primer lugar, el vector número de onda k es obtenido de la expresión 2.1.2.2-I. Esta ecuación puede ser solucionada por el método iterativo de Newton-Raphson. *ShorePlot* realiza este método hasta que la diferencia entre iteraciones es inferior a 0.000001, aproximándose a la línea de costa desde el valor de aguas profundas.

A continuación, de la expresión 2.1.2.2-II, se pueden obtener los valores separados de k_x y k_y y, por ende, el ángulo θ .

Esto se consigue discretizando la ecuación y avanzando, de nuevo desde aguas profundas hacia la línea de costa.

$$k_{x_{i,j}} = k_{x_{i,j+1}} + \frac{\Delta Y}{\Delta X} \left(\sqrt{k_{i,j+1}^2 - k_{x_{i,j+1}}^2} - \sqrt{k_{i-1,j+1}^2 - k_{x_{i-1,j+1}}^2} \right)$$

Ec. 2.1.2.2-IV: Discretización de la ecuación de fase para ángulos positivos. Fuente [3], pág. 10

En este paso, sin embargo, aparece la necesidad de una nueva condición de contorno; pues de lo contrario, la mitad triangular inferior de la matriz de resultados quedaría sin valores.

Así pues, *ShorePlot* asume, en el caso de extremos amortiguados, que la situación en el extremo desde el que incide el oleaje presenta una situación estable. De este modo, se obtiene la situación del extremo lateral por medio del sistema basado en la Ley de Snell. Esto posibilita la obtención de la matriz completa.

En último lugar, solucionando la ecuación 2.1.2.2-III, se obtiene la altura de ola $H(x,y)$.

Para ello, se soluciona la expresión discretizada de esta ecuación, que toma la forma:

$$H_{i,j}^2 = \frac{k}{c_g \sqrt{k^2 - k_x^2}} \Big|_{i,j} \left(c_g H^2 \frac{\sqrt{k^2 - k_x^2}}{k} \Big|_{i,j+2} - \frac{\Delta Y}{\Delta X} \left(c_g H^2 \frac{k_x}{k} \Big|_{i+1,j+1} - c_g H^2 \frac{k_x}{k} \Big|_{i-1,j+1} \right) \right)$$

Ec. 2.1.2.2-V: Discretización de la ecuación de conservación de energía. Fuente [3], pág. 11

Esta expresión, sin embargo, presenta el mismo problema que la ecuación principal de transporte de sedimentos: los extremos laterales.

Al igual que en el modelo publicado, *ShorePlot* considerará que el extremo del cual procede el oleaje presenta condiciones estables y se ajusta a los valores proporcionados por el modelo basado en la Ley de Snell.

En cuanto al otro extremo, se supone una amortiguación del oleaje con la misma premisa adoptada para los límites amortiguados en el transporte de sedimento:

$$\frac{\partial}{\partial x} c_g H^2 \frac{k_x}{k} \Big|_{Lx,j} = \lambda^{-1} \cdot \left(c_g H^2 \frac{k_x}{k} \Big|_{Lx,j} - c_g H^2 \frac{k_x}{k} \Big|_{Lx,j}^{eq.} \right)$$

Ec. 2.1.2.2-VI: Determinación del extremo amortiguado del oleaje, sentido Este. Fuente [3], pág. 11

Debido a estas consideraciones, el cálculo de la línea de costa por medio de este método se verá restringido a los límites amortiguados (quedando así la opción de periodicidad como exclusiva del método de Snell).

2.2. Hipótesis

Las consideraciones llevadas a cabo quedan bien definidas en dos grandes campos; el primero referido a la extensión y precisión de la zona de estudio, y el segundo al perfil de profundidad de la costa.

2.2.1. Extensión y precisión

En primer lugar, y con el objetivo de simplificar la comparación entre ensayos, se ha definido el campo de estudio como una zona rectangular de extensión 10000m por 1000m en dirección ‘x’ e ‘y’, respectivamente (ver figura adjunta).

La dirección ‘x’ quedará dividida en n_x nodos, cuya posición vendrá denotada por la letra i .

La dirección ‘y’ quedará dividida en n_y nodos, cuya posición vendrá denotada por la letra j .

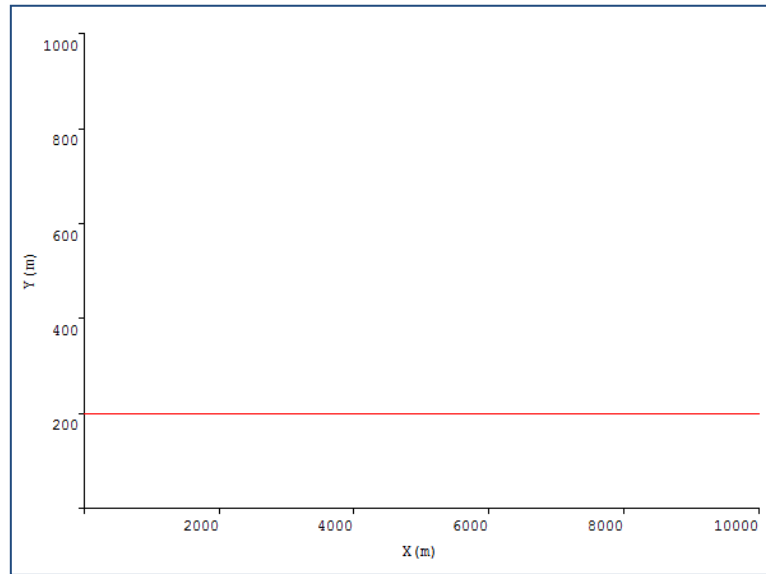


Fig. 2.2.1-a: Campo de estudio

En cuanto a la extensión temporal, cada episodio de cálculo se extenderá durante 365 días de 24h cada uno; resultando en un total de 31.536.000 segundos.

Este será dividido en nT pasos de tiempo, y su posición vendrá indicada con el índice k .

Así pues, y aunque la línea de costa (representada en la imagen en color rojo) pueda ser redefinida por el usuario, todos los ensayos se efectuarán en un campo de la misma extensión.

Además, también se entenderá que el límite superior de la zona de estudio ($y=1000m$) se corresponde con la situación de aguas profundas. Esto significa que los datos de oleaje proporcionados por el usuario se aplican en este punto.

Se tomará como Profundidad de Rotura (correspondiente al punto en que el transporte de sedimento tiende a ser nulo) un valor de 10m. Este valor se ha tomado a partir de la expresión de Hallermeier:

$$d_l = 2.28 H_{s12} - 68.5 \left(H_{s12}^2 / g T_s^2 \right)$$

Ec. 2.2.1-I: Ecuación de Hallermeier. Fuente [2]

Empleando dicha expresión en un entorno de $H_{s12}=4m$ y $T_s=6s$, se obtiene $D=8,34m$. Así pues, $D=10m$ resulta ser un valor adecuado a la par que conservador.

Por último, la precisión temporal (ΔT) viene definida por la condición de Courant-Friedrichs-Lewy y no por el usuario. Puesto que la expresión empleada para obtener la línea de costa es una ecuación diferencial en derivadas parciales y se emplea una solución explícita, esta restricción permite evitar resultados incorrectos asegurando la convergencia. La forma que toma la condición adoptada en este problema es la siguiente:

$$\Delta T \leq \frac{(\Delta X)^2}{G}$$

Ec. 2.2.1-II: Condición de Courant. Fuente [1], pág. 332

Donde G viene expresado como:

$$G = \frac{K \cdot (H_b)^{5/2} \cdot \rho_w \cdot \sqrt{g/\gamma_b}}{16 \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot (1 - p) \cdot D}$$

Ec. 2.2.1-III: Condición de Courant. Fuente [1], pág. 332

2.2.2. Profundidad: Perfil de Dean

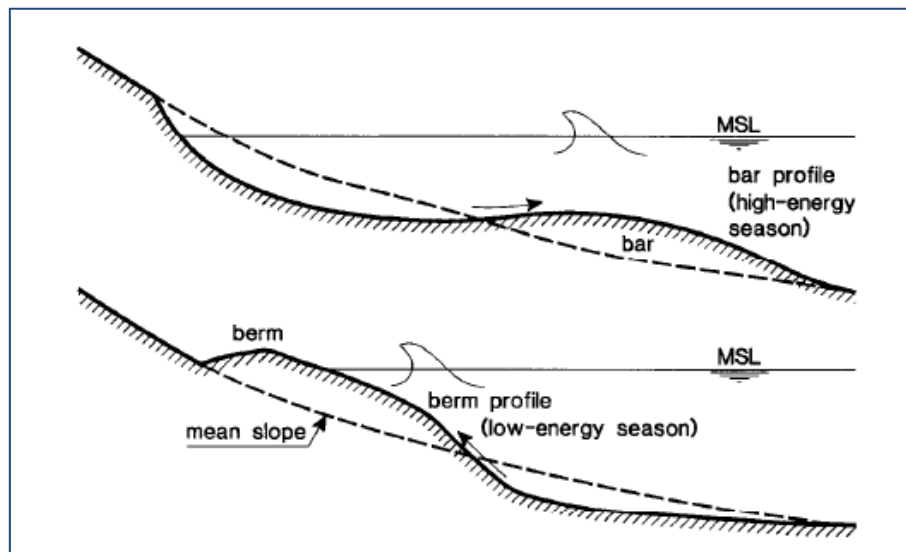


Fig. 2.2.2-a: Perfiles estacionales en relación al perfil medio. Fuente [2]

Puesto que el objetivo de este estudio reside en la modelización del transporte longitudinal del sedimento a lo largo de la playa, no se considera de forma activa la evolución de la costa en el sentido transversal.

Así pues, se simplifican los períodos estacionales en un perfil único proporcionado por la ecuación de Dean, que dará valor a la profundidad de todos los puntos del campo de estudio en función de su distancia a la línea de costa. A efectos del cálculo, dicha distancia se ha medido de forma individual y separada para cada división en ‘x’ de la malla.

$$D = A \cdot y^{2/3}$$

Ec. 2.2.2-I: Ecuación del perfil de Dean. D(m) en función de y(cm). Fuente [2]

Esta ecuación proporciona un perfil medio en función de un parámetro ‘A’ que, a su vez, depende del grosor del sedimento, siguiendo la siguiente ordenación:

$$A = 0,41 \cdot d_{50}^{0,94}, d_{50} < 0,4 \text{ mm}$$

$$A = 0,23 \cdot d_{50}^{0,32}, 0,4 \text{ mm} < d_{50} < 10 \text{ mm}$$

$$A = 0,23 \cdot d_{50}^{0,28}, 10 \text{ mm} < d_{50} < 40 \text{ mm}$$

$$A = 0,46 \cdot d_{50}^{0,11}, d_{50} > 40 \text{ mm}$$

Ec. 2.2.2-II: Parámetro A en función de d₅₀. Fuente [2]

En la figura 2.2.2-b se puede apreciar la evolución de la profundidad con el aumento de la distancia a la costa (situada en y = 0 m) y para diferentes parámetros ‘A’:

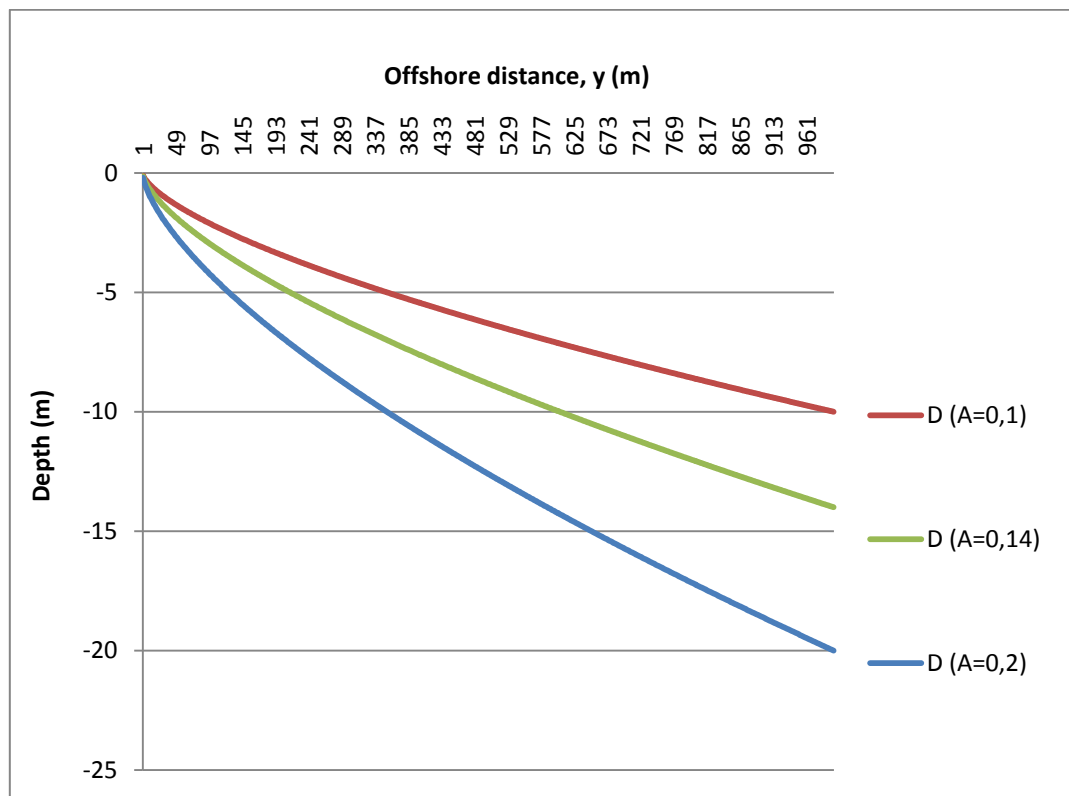


Fig. 2.2.2-b: Comparación del perfil de Dean para $A=0,1$, $A=0,14$ y $A=0,2$

3. Programación

En este capítulo se hará un análisis del funcionamiento interno de *ShorePlot*.

En primer lugar se detallará el lenguaje de programación empleado, así como las diferentes herramientas de soporte de las que se ha hecho uso para hacer posibles sus diferentes funciones.

A continuación, se hará un análisis esquematizado del funcionamiento interno del software, incluyendo el itinerario seguido por las diferentes variables hasta obtener el resultado final.

3.1. Soporte

3.1.1. Elección del lenguaje

El software *ShorePlot* ha sido diseñado por completo en el lenguaje *Fortran95* (a menudo abreviado como *FTN95*).

En la fase de definición inicial del estudio, se barajó la alternativa de emplear *Matlab* y construir el programa como una estructura de scripts en dicha plataforma. Se consideraron los siguientes puntos:

	<i>Matlab</i>	<i>Fortran95</i>
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Soporte inherente de representación visual de datos • Interfaz sencilla e intuitiva 	<ul style="list-style-type: none"> • Lenguaje compilado (mayor velocidad de cálculo) • Disponibilidad de compiladores gratuitos
Inconvenientes	<ul style="list-style-type: none"> • Lenguaje interpretado (menor velocidad de cálculo) • Software de propiedad 	<ul style="list-style-type: none"> • Sin interfaz; necesidad de un compilador • Sin soporte para representación visual de datos

Tab. 3.1.1-1: Comparación inicial de lenguajes; ventajas e inconvenientes

Pese a la aparente superioridad de *Matlab*, se decidió dar más importancia a la agilidad y control del cálculo que a los aspectos visuales, motivo por el que se escogió *Fortran*.

En cuanto al compilador empleado, finalmente se optó por emplear la plataforma de la empresa *Silverfrost Ltd: Plato*.

Las dos grandes ventajas de esta plataforma frente a los otros compiladores (tales como *G95* ó *GNU gfortran*) son la inclusión de una interfaz de trabajo equivalente a la que proporciona *Matlab* y la integración de rutinas de representación visual (*PL-Plot* y *ClearWin*).



Fig. 3.1.1-a: Silverfrost-Plato

De esta manera, se podría decir que se obtiene una opción que reúne todas las ventajas y ninguno de los inconvenientes listados anteriormente.

```

426 END SUBROUTINE shore_calc_snell
427
428 !-----
429 !----- Calculate Shore - Quasi 2D-Morpho -----
430 !-----
431 SUBROUTINE shore_calc_q2dm
432   use definitions
433   implicit none
434   include <windows.ins>
435   real*8 :: progress,D_groin,Q_lim_n,Q_lim_0
436   integer :: i,j,k,m,ctrl,propagate_q2dmorpho
437   external propagate_q2dmorpho
438
439   progress=0.0
440   i=winio@('%1.10b[thin_pannelled]%ww[no_caption,topmost,no_frame]&')
441   i=winio@('%Processing... %2nl&')
442   i=winio@('%bg[white]%20br[percentage]%cb&%',progress,RGB(100,155,100))
443   i=winio@('%lw[owned]',ctrl)
444
445   !Initial time:
446   m=propagate_q2dmorpho(ys_omni(1,:))
447   do i=1,n+1
448     Hb(i,1)=Hb_local_2D(i)
449     theta_b(i,1)=theta_b_local_2D(i)
450     H(i,1)=H_vis(i,:)
451     theta(i,1)=theta_2dm(i,:)
452   enddo
453
454   !H plot sub-window
455   !$$$$$$$ i=winio@('%ww[topmost,no_caption,no_frame]%ca[Wave Height]&')
456   !$$$$$$$ i=winio@('%1.10b%1.20b[no_border]%pl[x_axis=Y,y_axis=H,colour=blue,x_array]%cb%cn%bt[Close]%cb%cb%',500,400,ny+1,y,H(25,:,1))
457
458   do k=1,nT
459
460     !Calculate Q (Sediment flux) -----
461     !Obtain bypass ratios
462     do i=1,n+1
463       !Calculate Q(i) and ...

```

Fig. 3.1.1-b: Silverfrost-Plato, interfaz de usuario

3.1.2. Características de Fortran95

A diferencia de otros lenguajes de programación, *Fortran* requiere que cada una de las variables que se vayan a emplear sea declarada con anterioridad.

Además, a cada una de estas variables se le debe asignar un tipo, una dimensión y una cantidad de memoria dedicada. Los tipos empleados en el desarrollo de *ShorePlot* son:

- *Real*: Número real; parte entera y decimales.
- *Integer*: Número entero; sin decimales.
- *Character*: Empleado comúnmente para representar texto. Puede incluir letras y números, pero no puede utilizarse en operaciones matemáticas.

Para la elaboración de *ShorePlot*, también se ha hecho uso de dos tipos especiales de variable:

- *Parameter*: Define una constante. El valor asignado a esta variable no podrá verse alterado desde el momento de su declaración. Se empleará para los números π (3.1415927), g (9.80665) y e (2.718282).
- *Allocatable*: Subtipo; esta característica se especifica después del tipo principal. Cualquier variable así designada admitirá reajustes posteriores en su dimensión y memoria dedicada. Su uso en el programa se reservará para todas aquellas variables que dependan del tamaño y precisión de la malla de cálculo.

3.2. Estructura interna del programa

En el código de *ShorePlot* pueden hallarse cuatro tipos de estructura: *PROGRAM*, *SUBROUTINE*, *FUNCTION* y *MODULE*.

PROGRAM representa el cuerpo principal del programa. Desde esta estructura se efectúan las llamadas a funciones y subrutinas secundarias y se gestiona la ordenación de las variables.

FUNCTION y *SUBROUTINE* son las etiquetas que reciben todos los paquetes de código secundarios. Estos son llamados desde el programa principal o desde otros paquetes secundarios para ejecutar el código de manera ordenada.

Aunque el funcionamiento esencial de *FUNCTION* y *SUBROUTINE* sea el mismo, existen algunas diferencias.

En primer lugar, las funciones trabajan con argumentos. $B = \text{function}(A)$ asignaría a B el resultado de aplicar la función *function* sobre el valor A . La limitación de este tipo de subprogramas reside en su capacidad de proporcionar una única variable de salida; en este caso, B .

Por otro lado, las subrutinas son capaces de actuar sobre cualquier variable de su espacio de trabajo. *CALL Subroutine* provocaría la ejecución de la subrutina *Subroutine* y los cambios que esta produjera se verían reflejados de inmediato en las variables involucradas. A diferencia de las funciones, sin embargo, las subrutinas presentan ciertas restricciones a la hora de ser ejecutadas, lo cual a menudo hace de su aplicación un asunto complejo.

Tanto las funciones como las subrutinas, en calidad de subprogramas, trabajan con sus propios espacios de variables. Esto significa que toda variable declarada en una función o subrutina no será accesible desde fuera de la misma (a excepción de la variable de salida de las funciones).

Para solucionar esto, existe el término *MODULE*. Esta estructura debe entenderse como un conjunto de definiciones globales que se ve compartida por todos aquellos subprogramas que incluyan la palabra *use*, seguido del nombre del módulo, junto a sus declaraciones de variables internas.

De esta manera, es posible crear una bolsa de variables globales y facilitar el trabajo entre subprogramas.

3.2.1. Funciones y variables

A continuación se detallan algunas partes del código de *ShorePlot*, incluyendo los subprogramas y variables más relevantes.

MODULE definitions

Módulo definido al inicio del programa. Contiene las definiciones de la mayoría de variables y sirve de enlace entre espacios de trabajo. Gracias a este módulo, se hace posible el acceso global a las variables aquí definidas.

PROGRAM sedtrans

Programa principal. Sirve de matriz para el funcionamiento ordenado del programa. Define la interfaz de usuario.

SUBROUTINE shore_calc_snell

Ejecuta el cálculo principal del programa cuando se escoge el método según la Ley de Snell. Obtiene los valores de la línea de costa y del caudal de sedimentos para todos los puntos del área de estudio y para cada instante de tiempo. Durante su ejecución, efectúa diversas llamadas a la función **propagate_snell(y_value)** para obtener los valores de Hb y theta_b.

SUBROUTINE shore_calc_q2dm

Ejecuta el cálculo principal del programa cuando se escoge el método según el modelo Q2D-morfo. Obtiene los valores de la línea de costa y del caudal de sedimentos para todos los puntos del área de estudio y para cada instante de tiempo. Durante su ejecución, efectúa una llamada a la función **propagate_q2dmorpho(y_value)** para obtener los valores de Hb y theta_b.

FUNCTION propagate_snell(y_value)

Obtiene los valores altura de ola y ángulo de incidencia del oleaje según la Ley de Snell. El argumento **y_value** es empleado para generar el campo de profundidades atendiendo al perfil de Dean.

FUNCTION propagate_q2dmorpho(y_value)

Obtiene los valores altura de ola y ángulo de incidencia del oleaje según el modelo Q2D-morfo. El argumento **y_value** es empleado para generar el campo de profundidades atendiendo al perfil de Dean.

FUNCTION strtonum(str)

Función auxiliar que permite transformar una variable tipo *CHARACTER* (texto) en otra de tipo *REAL* (número). Sólo da resultados válidos si el texto está formado por caracteres numéricos y hace posibles las operaciones matemáticas con la nueva variable.

FUNCTION numtostr(num)

Función auxiliar que permite transformar una variable tipo *REAL* (número) en otra de tipo *CHARACTER* (texto) para poder representarla en la interfaz

ys_omni

Variable que recoge las posiciones de la línea de costa para cada nodo de la malla y en cada paso de tiempo.

Q

Variable que recoge los valores del caudal de sedimento para cada nodo de la malla y en cada paso de tiempo.

Hb

Variable que recoge las alturas de rotura del oleaje para cada punto de la malla y en cada paso de tiempo.

theta_b

Variable que recoge los ángulos de rotura del oleaje para cada punto de la malla y en cada paso de tiempo.

H

Variable que comprende las alturas de ola en todo el campo de estudio y para cada instante de tiempo.

Theta

Variable que comprende los ángulos sucesivos del oleaje en todo el campo de estudio y para cada instante de tiempo.

3.2.2. Flujo de trabajo

La siguiente imagen representa de manera gráfica el esquema general de funcionamiento de *ShorePlot*:

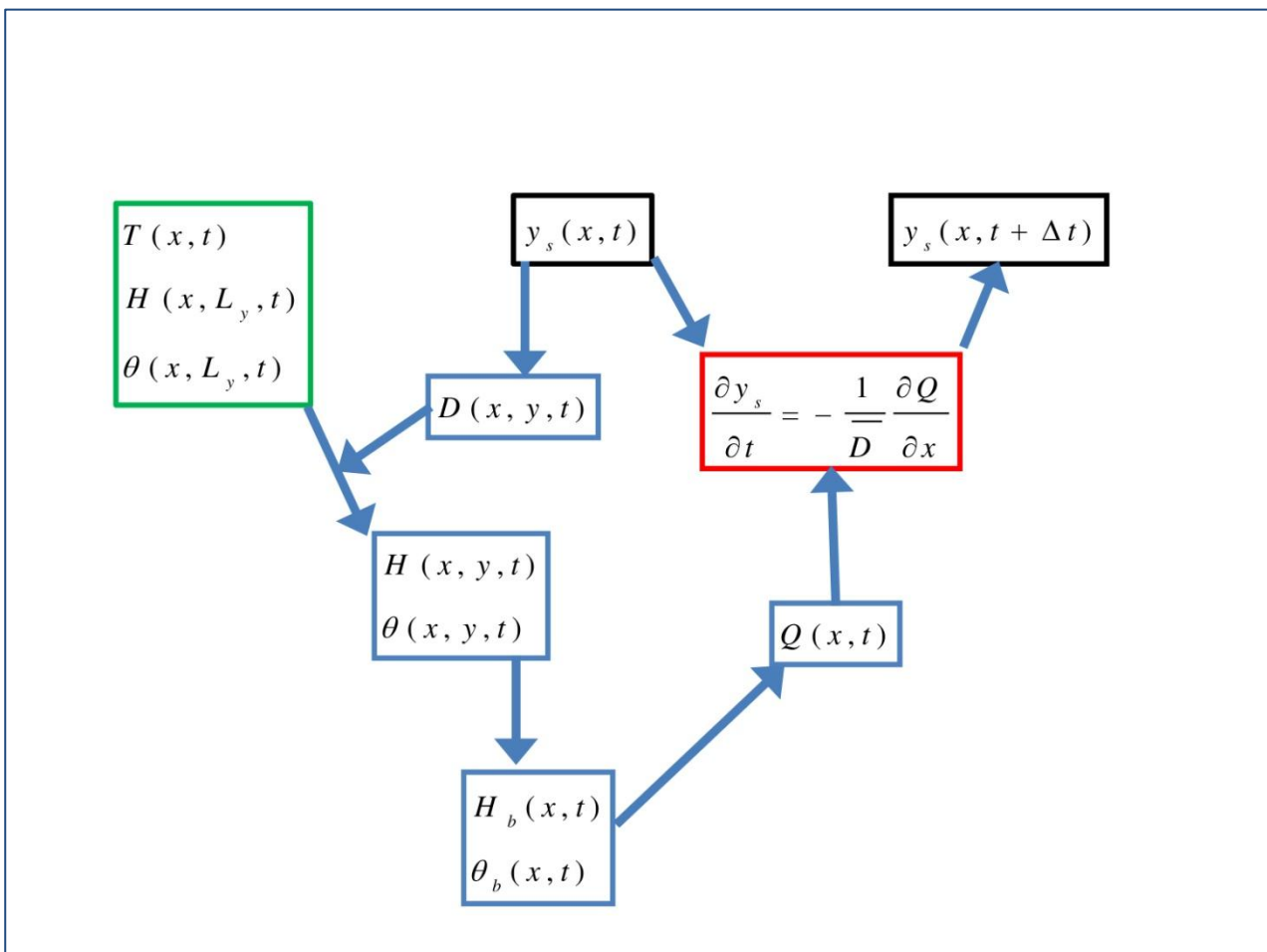


Fig. 3.2.2-a: Esquema de funcionamiento de *ShorePlot*

Siendo los datos de partida (especificados por el usuario del programa):

$y_s(x, t)$: Posición de la línea de costa en el instante de tiempo inicial.

$T(x, t)$: Período del oleaje. Valor constante a lo largo de todo el ensayo.

$H(x, L_y, t)$: También representado como H_0 . Altura de ola en el extremo superior de la malla (Aguas profundas). Valor constante a lo largo de todo el ensayo.

$\theta(x, L_y, t)$: También representado como θ_0 . Ángulo de incidencia del oleaje en el extremo superior de la malla (Aguas profundas). Valor constante a lo largo de todo el ensayo.

A partir de la línea de costa inicial $y_s(x, t)$, y por medio del perfil de Dean, se obtiene una matriz de valores de profundidad para todo el campo de estudio: $D(x, y, t)$.

Conocido el valor de la profundidad en cualquier punto, se procede a la propagación del oleaje. Por medio de las funciones **propagate_snell** y **propagate_q2dmorpho** (según el método escogido de propagación), se obtienen los valores de altura de ola $H(x, y, t)$ y ángulo de incidencia $\theta(x, y, t)$ en toda la extensión del campo de estudio.

Sin embargo, una vez alcanzado el valor de H que cumple:

$$\gamma_b = \frac{H}{D}$$

Ec. 3.2.2-I: Condición de rotura del oleaje. Fuente [11]

Se entenderá que dicho valor es el valor de altura de ola con que rompe el oleaje (H_b) y el ángulo con que rompe el oleaje (θ_b) se encontrará en el mismo punto.

Llegados a esta situación, y conocidos H_b y θ_b , se emplea la expresión:

$$Q_i = \mu \cdot H_b^{5/2} \cdot \sin(2 \cdot (\theta_b - \varphi_i))$$

Ec. 3.2.2-II: Caudal de sedimento. Fuente [1], pág. 331

Que, con:

$$\varphi_i = \text{atan}\left(\frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2 \cdot \Delta x}\right)$$

Ec. 3.2.2-III: Ángulo de inclinación local de la costa. Fuente [1], pág. 331

Queda de la forma:

$$Q_i = \mu \cdot H_b^{5/2} \cdot \sin \left(2 \cdot \left(\theta_b - \arctan \left(\frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2 \cdot \Delta x} \right) \right) \right)$$

Ec. 3.2.2-IV: Caudal de sedimento. Fuente [1], pág. 331

Determinado $Q(x, t)$, y puesto que se conoce la posición de la línea de costa en el instante inicial, se obtiene la línea de costa en el instante inmediatamente posterior ($y_s(x, t + \Delta T)$) por medio de la expresión:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{1}{D} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x}$$

Ec. 3.2.2-V: Ecuación de continuidad. Fuente [1], pág. 332

Que queda discretizada de la forma:

$$y_i^{n+1} = y_i^n - \frac{\Delta t}{D} \cdot \frac{Q_{i+1}^{n+1} - Q_{i-1}^{n+1}}{2 \cdot \Delta x}$$

Ec. 3.2.2-VI: Ecuación de continuidad. Fuente [1], pág. 332

Obtenido este valor, únicamente resta repetir el proceso empleando la nueva línea de costa como situación inicial, obteniendo así de forma efectiva la evolución paulatina de la playa en su conjunto.

3.2.3. Representación visual

Como ya se ha mencionado anteriormente, *Fortran* carece de una manera intrínseca de representar datos de manera visual o de generar una interfaz gráfica. Es por este motivo que, en el desarrollo de *ShorePlot*, se ha hecho uso de las plataformas *ClearWin* y *PL-Plot*; ambas incluidas en el programa paquete de *Silverfrost Ltd*.

ClearWin es responsable de la totalidad de la interfaz de *ShorePlot* a excepción de los gráficos de representación de datos, que son obra de *PL-Plot*.

Ambos funcionan con llamadas a funciones y subrutinas internas con un funcionamiento muy específico y basado en argumentos. Para documentación adicional, ver fuentes [5], [6] y [7].

4. Manual de funcionamiento

Este capítulo está dedicado a la experiencia del usuario con *ShorePlot*, y su objetivo es el de tratar de guiarlo a través de los diferentes menús y pantallas.

4.1. Sobre *ShorePlot*



Fig. 4.1-a: Icono de *ShorePlot*

ShorePlot es un software de simulación de una línea de costa, basado en las ecuaciones del transporte de sedimentos y de continuidad que se detallan en los capítulos de principios teóricos.

El lenguaje de programación empleado para su desarrollo es *Fortran95*, y se ha desarrollado con el soporte de las plataformas *ClearWin* y *PL-Plot*. El archivo proporcionado ha sido compilado para el sistema *Windows*. Sin embargo, se proporciona también el código fuente del software por si fuera necesario compilarlo para una plataforma distinta.

Como parte integral de un trabajo de fin de grado en Ingeniería Civil (Šimić Sans, Marcos M. *Model d'una línia fortament no linial per les ones de sorra en una platja* 2015), goza de un enfoque puramente académico. De este modo, da una amplia libertad al usuario para combinar infinidad de situaciones costeras y observar la evolución resultante.

Debe mencionarse también que el programa no coarta de forma agresiva la elección de parámetros por parte del usuario. Así pues, recae en el usuario la responsabilidad de introducir correctamente las variables de partida. Como nota adicional, el separador decimal empleado en el programa es el punto (.).

Con todo, *ShorePlot* ha sido diseñado con la simplicidad como meta. Un usuario interesado en conocer la evolución de la línea de costa no debería tener problemas para navegar la interfaz e interpretar los resultados sin ayuda de este manual.

En el proceso de propagación del oleaje, se presenta la opción de elegir entre el modelo Q2D-morfo o un método simplificado basado en la Ley de Snell (ambos descritos y detallados en el capítulo dedicado a fundamentos teóricos), así como de escoger qué tipo de condiciones de contorno se deben aplicar: periodicidad o límites amortiguados.

4.2. Interfaz de usuario

Al iniciar el programa, la primera imagen que aparece es la siguiente:

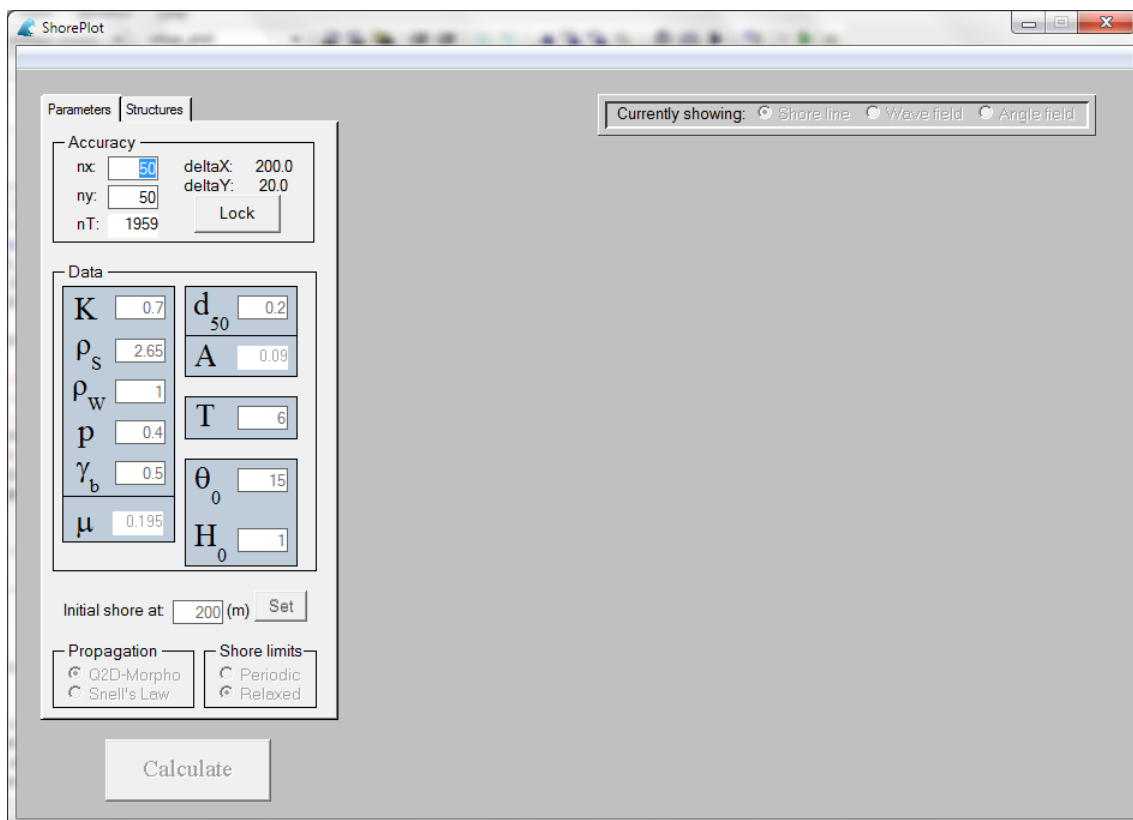


Fig. 4.2-a: Interfaz de *ShorePlot*. Malla

Lo primero que se aprecia es un menú lateral a mano izquierda, con la pestaña *Parameters* en activo, y la mayoría de los campos en un estado de bloqueo. Lo mismo sucede si se activa la pestaña *Structures*.

Así pues, el primer paso para hacer funcionar el programa consiste en determinar la malla de cálculo, situada dentro del campo *Accuracy*.

El campo *nx* representa el número de puntos en que quedará dividida la malla horizontal (sentido longitudinal de la playa), mientras que el campo *ny* lo hace de la malla vertical (proximidad/lejanía de la línea de costa). A mayor cantidad de puntos seguirá una mayor precisión, pero también un mayor tiempo de cálculo.

Nótese que, al editar estos parámetros, los valores de *deltaX* y *deltaY* se ajustan de manera automática, puesto que la extensión de la zona de estudio es constante y predeterminada (10000m x 1000m).

Resulta relevante destacar también la incapacidad del usuario de alterar el valor de *nT*, correspondiente a la precisión de la malla temporal. Tal como se ha explicado en el capítulo dedicado a fundamentos teóricos, el método de resolución empleado por el programa viene limitado por la condición de Courant, que afecta al paso de tiempo (*deltaT*). De forma automática, *ShorePlot* se asegura de que se cumpla este requisito para evitar falsos resultados.

Por defecto, el programa está configurado para calcular 50 nodos en dirección ‘x’ y 50 nodos en dirección ‘y’. Esto proporciona unos parámetros $\Delta X=200\text{m}$ y $\Delta Y=20\text{m}$.

En caso de proporcionar una malla incorrecta, los siguientes mensajes de error pueden aparecer:

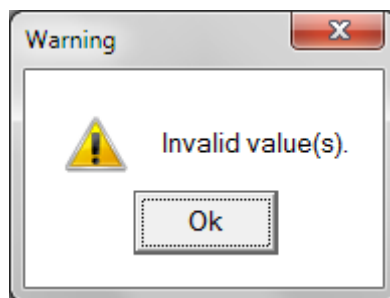


Fig. 4.2-b: Error de mallado n°1 de *ShorePlot*

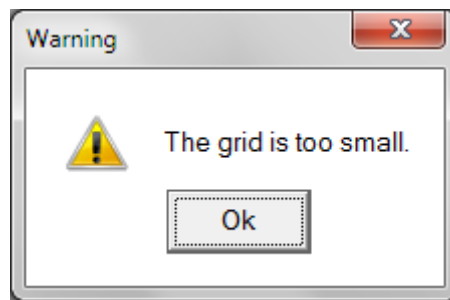


Fig. 4.2-c: Error de mallado n°2 de *ShorePlot*

Aparecen al intentar configurar una malla con uno o varios valores de n inferiores a la unidad.

Alternativamente, si el programa necesitara más memoria de la disponible para emplear una malla de las dimensiones indicadas, el siguiente mensaje debería aparecer:

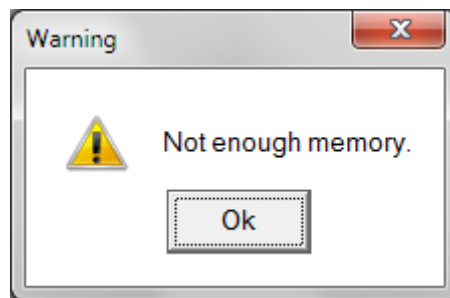
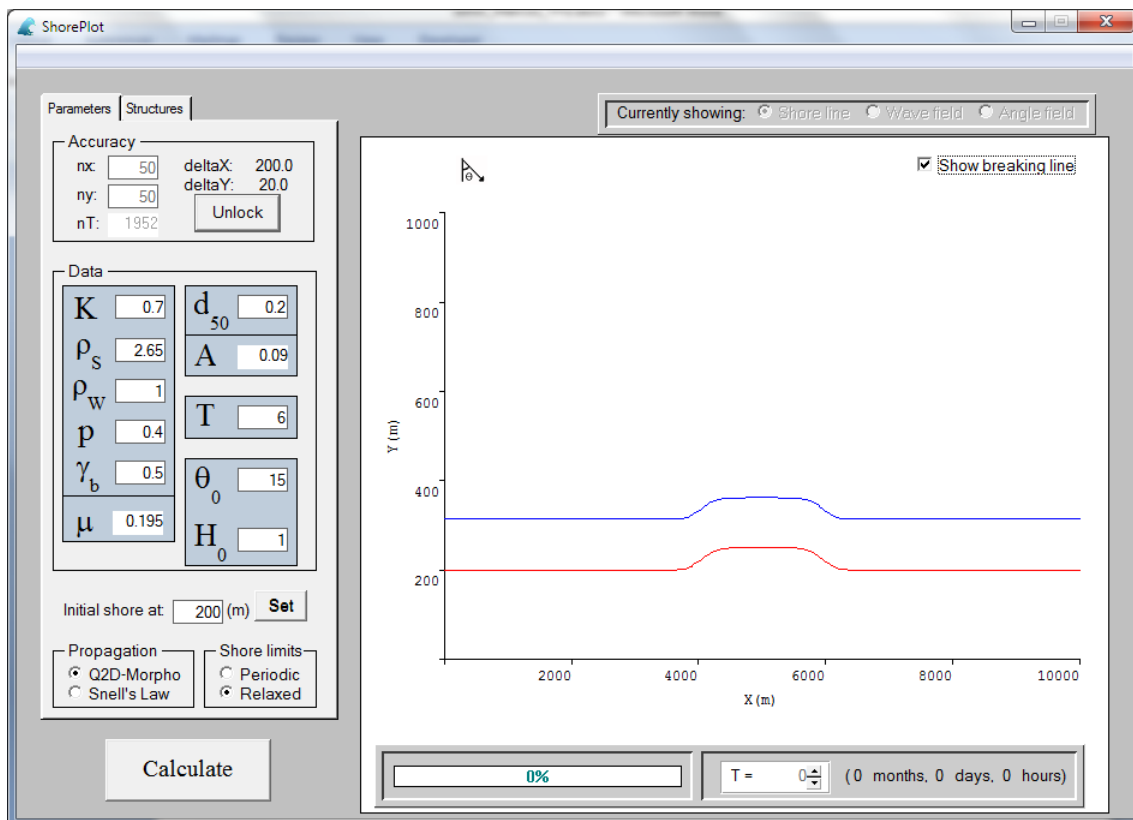


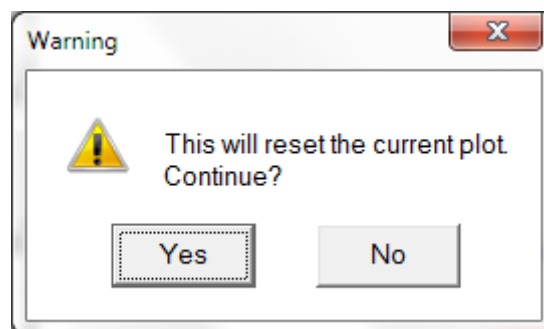
Fig. 4.2-d: Error de mallado n°3 de *ShorePlot*

Una vez escogida la malla, el botón *Lock* habilitará la edición de parámetros y la interfaz cambiará ligeramente:

Fig. 4.2-e: Interfaz de *ShorePlot*. Edición de parámetros

El cambio más evidente es la aparición de un nuevo panel en la parte derecha de la interfaz. Este panel representa la costa en una perspectiva aérea, y actualmente refleja una hipotética situación inicial.

Nótese como, además de desbloquearse la edición de parámetros, la edición de la precisión de la malla queda bloqueada; y el botón *Lock* pasa a rezar *Unlock*. Si deseara el usuario alterar la malla escogida, la línea de costa y los parámetros volverían a este estado inicial.

Fig. 4.2-f: Advertencia de reseteo de *ShorePlot*

Los parámetros situados en el cajón *Data*, corresponden a la situación marítima de la playa de estudio.

K : Constante del transporte de sedimentos (adimensional)

ρ_s : Densidad del sedimento (kg/l)

ρ_w : Densidad del agua (kg/l)

p : Valor de porosidad del sedimento (entre 0 y 1)

γ_b : Índice de rotura (adimensional)

d_{50} : Grosor del sedimento, fracción 50 (mm)

T : Período del oleaje incidente (s)

H_0 : Altura de ola. Medido en aguas profundas (m)

θ_0 : Grado de incidencia del oleaje. Medido en aguas profundas ($^\circ$)

Los valores de μ y A no admiten edición y son calculados automáticamente en función de los otros parámetros.

A continuación, se presenta la opción de escoger la situación de la línea de costa inicial. Esta nueva línea de costa será completamente recta y estará situada a la distancia del origen especificada por el usuario.

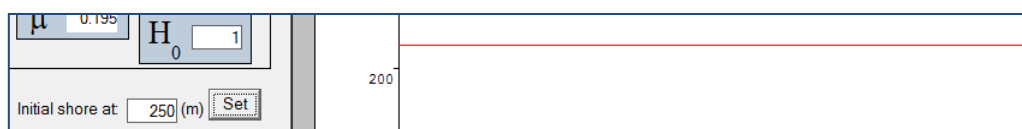
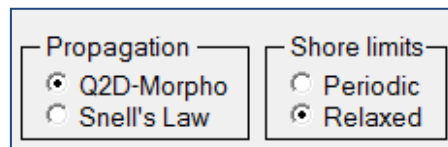


Fig. 4.2-g: Determinación de la línea de costa inicial en *ShorePlot*

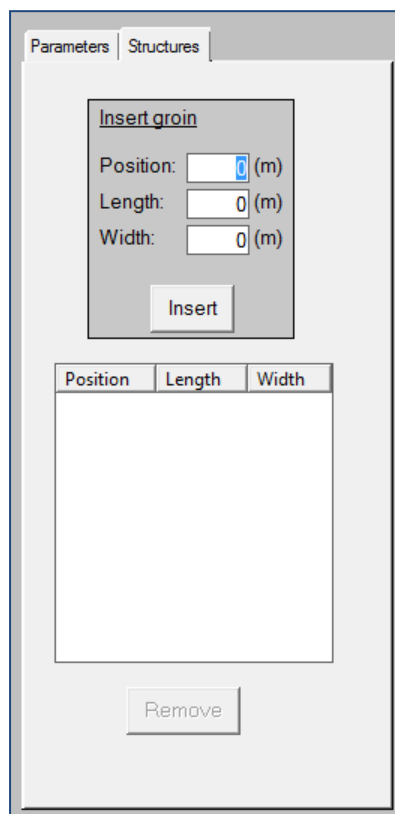
Por último, el panel *Parameters* da la opción de escoger el tipo de propagación de oleaje que se va a realizar (Snell o Q2D-morfo) y la configuración de los límites laterales (Periódicos o Relajados).



The screenshot shows two panels. The 'Propagation' panel has two radio buttons: 'Q2D-Morpho' (selected) and 'Snell's Law'. The 'Shore limits' panel has two radio buttons: 'Periodic' and 'Relaxed' (selected).

Fig. 4.2-h: Alternativas de propagación en *ShorePlot*

En último lugar, *ShorePlot* ofrece la posibilidad de añadir espigones a la playa de estudio. Esto se logra accediendo a la pestaña superior *Structures*, tras lo cual se muestra el siguiente panel:



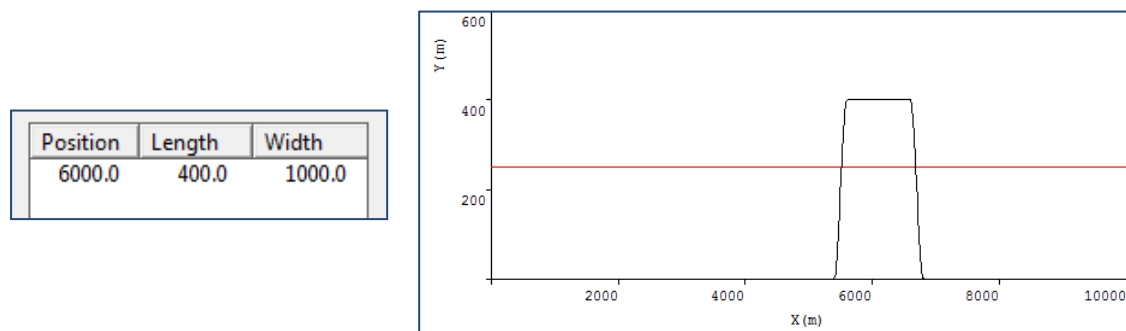
The screenshot shows the 'Structures' tab of the ShorePlot interface. It contains an 'Insert groin' section with three input fields: 'Position' (with a cursor), 'Length' (set to 0), and 'Width' (set to 0), all followed by '(m)'. Below these fields is an 'Insert' button. At the bottom of the panel is a 'Remove' button. Above the 'Remove' button is a table with three columns: 'Position', 'Length', and 'Width'. The table is currently empty.

Fig. 4.2-i: Inserción de estructuras en *ShorePlot*

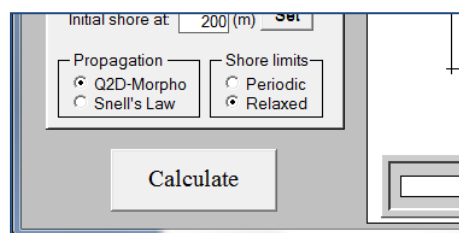
En la parte superior aparecen tres campos llamados: *Position*, *Length*, y *Width*.

Estos determinaran, respectivamente, la posición del espigón en el sentido longitudinal de la playa; la longitud del espigón en el sentido hacia aguas profundas y su anchura.

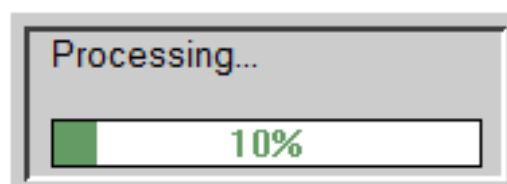
En caso de querer eliminar o alterar las propiedades de un espigón añadido con anterioridad, es suficiente con seleccionarlo de la lista inferior y presionar el botón *Remove*.

Fig. 4.2-j: Ejemplo de estructura en *ShorePlot*

Una vez determinada la situación inicial de la costa de estudio, únicamente queda presionar el botón *Calculate*, en el extremo inferior izquierdo.

Fig. 4.2-k: Botón *Calculate* en *ShorePlot*

Seguidamente, una barra de progreso aparecerá en pantalla. El porcentaje mostrado refleja la medida en que la evolución de la línea de costa ha sido calculada. Tal como se indica en el capítulo de consideraciones, el 100% representa un año de evolución bajo las condiciones iniciales.

Fig. 4.2-L: Barra de progreso en *ShorePlot*

Una vez finalizado el cálculo, queda bloqueada la edición de los parámetros y se hace posible la visualización del resultado.

En la parte inferior del gráfico, queda activado el panel mostrado en la imagen que sigue:

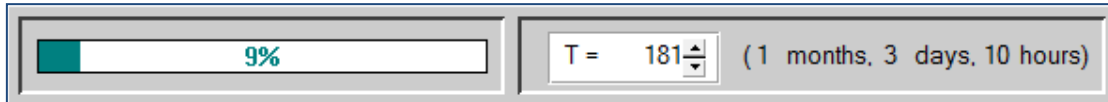


Fig. 4.2-m: Panel de control temporal de *ShorePlot*

Este panel hace posible escoger una fecha a partir del inicio del experimento, donde T representa la cantidad de pasos de tiempo nT que han transcurrido. A continuación, sin embargo, dicha medida temporal queda inmediatamente traducida a meses, días y horas para facilitar su comprensión. La barra porcentual que queda a mano izquierda indica qué proporción representa dicho tiempo respecto al episodio total (doce meses).



Fig. 4.2-n: Opción de mostrar la línea de rompientes en *ShorePlot*

Otra función que presenta *ShorePlot* es la de mostrar u ocultar la línea de rompientes del oleaje. En caso de estar esta opción activa, una línea de color azul mostrará dicha franja en el gráfico.

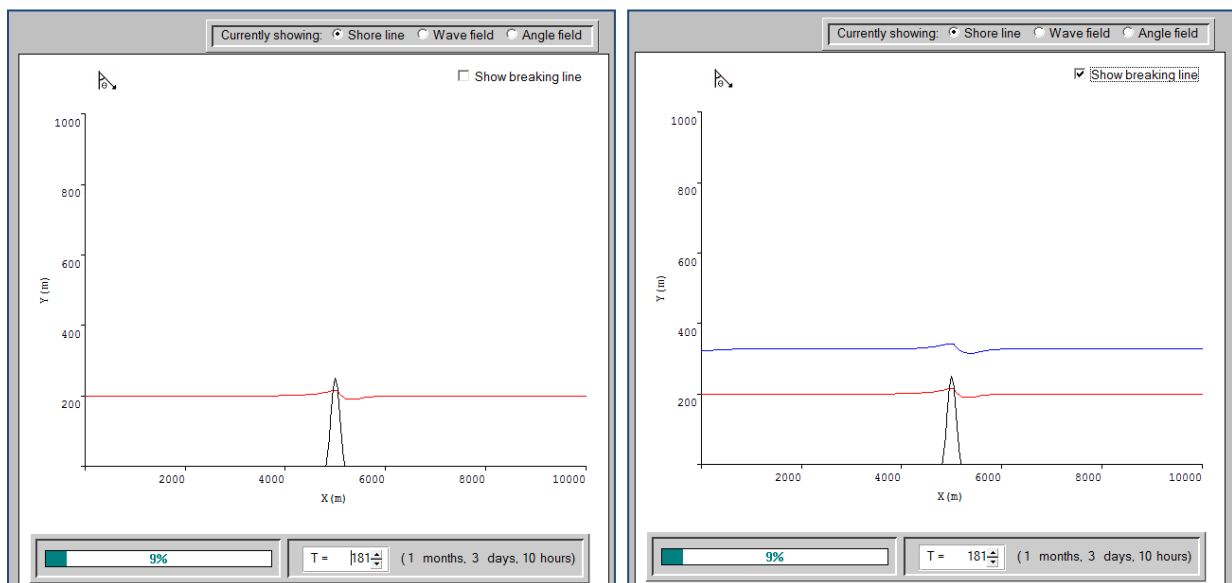


Fig. 4.2-o: Ejemplo de una línea de costa (en rojo). A la derecha, con línea de rompientes (en azul).

Por último, el panel superior queda también activado. Esto posibilita al usuario para elegir qué datos se muestran en el gráfico. Las alternativas son: *Shore line*, *Wave field* y *Angle field*; que mostrarán, de manera respectiva: la línea de costa, el campo de alturas de ola y el campo de ángulos de incidencia del oleaje.

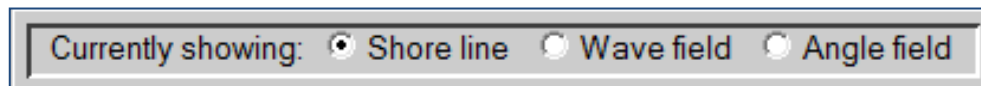


Fig. 4.2-p: Panel superior en *ShorePlot*, presentación de resultados.

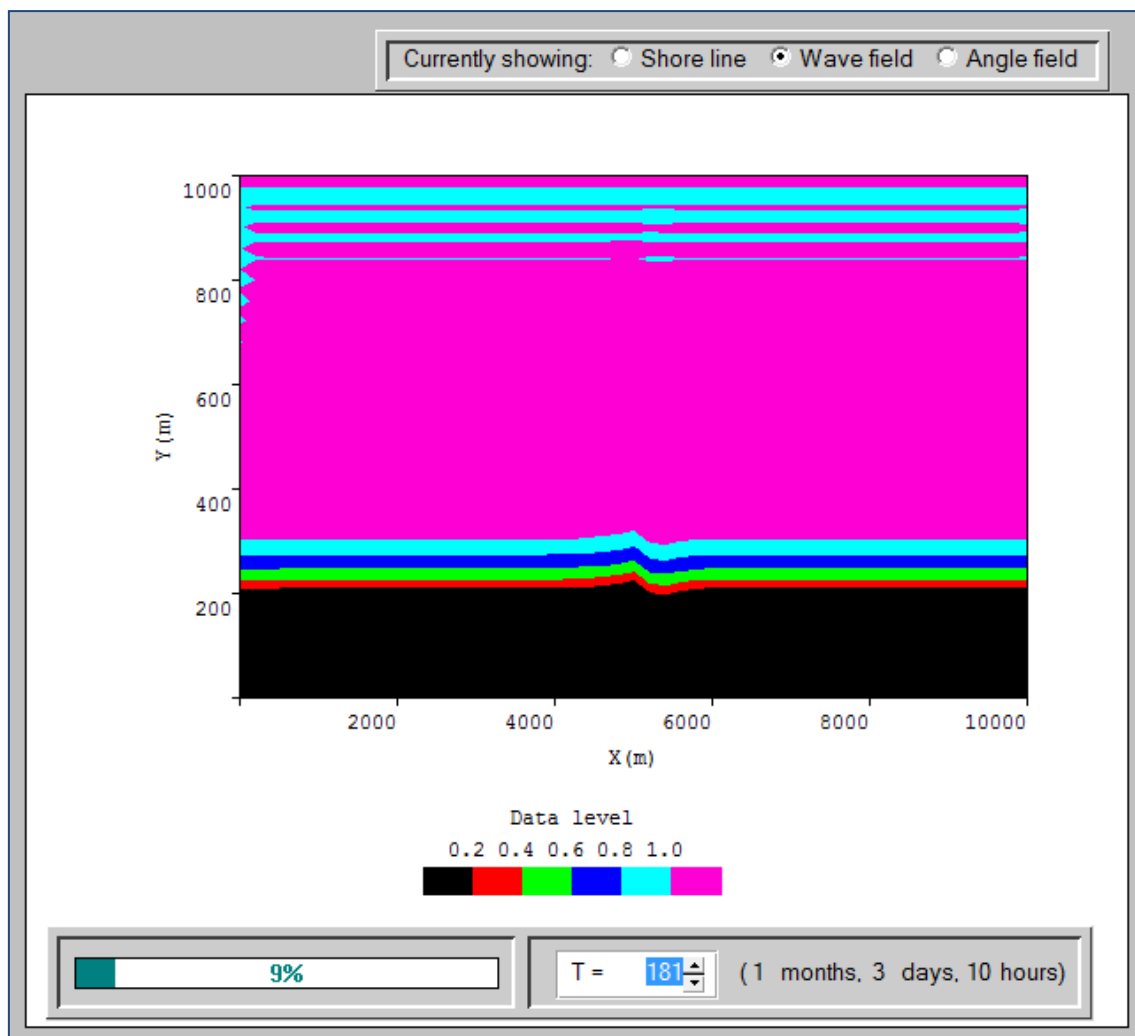


Fig. 4.2-q: Ejemplo de campo de alturas de ola en *ShorePlot*

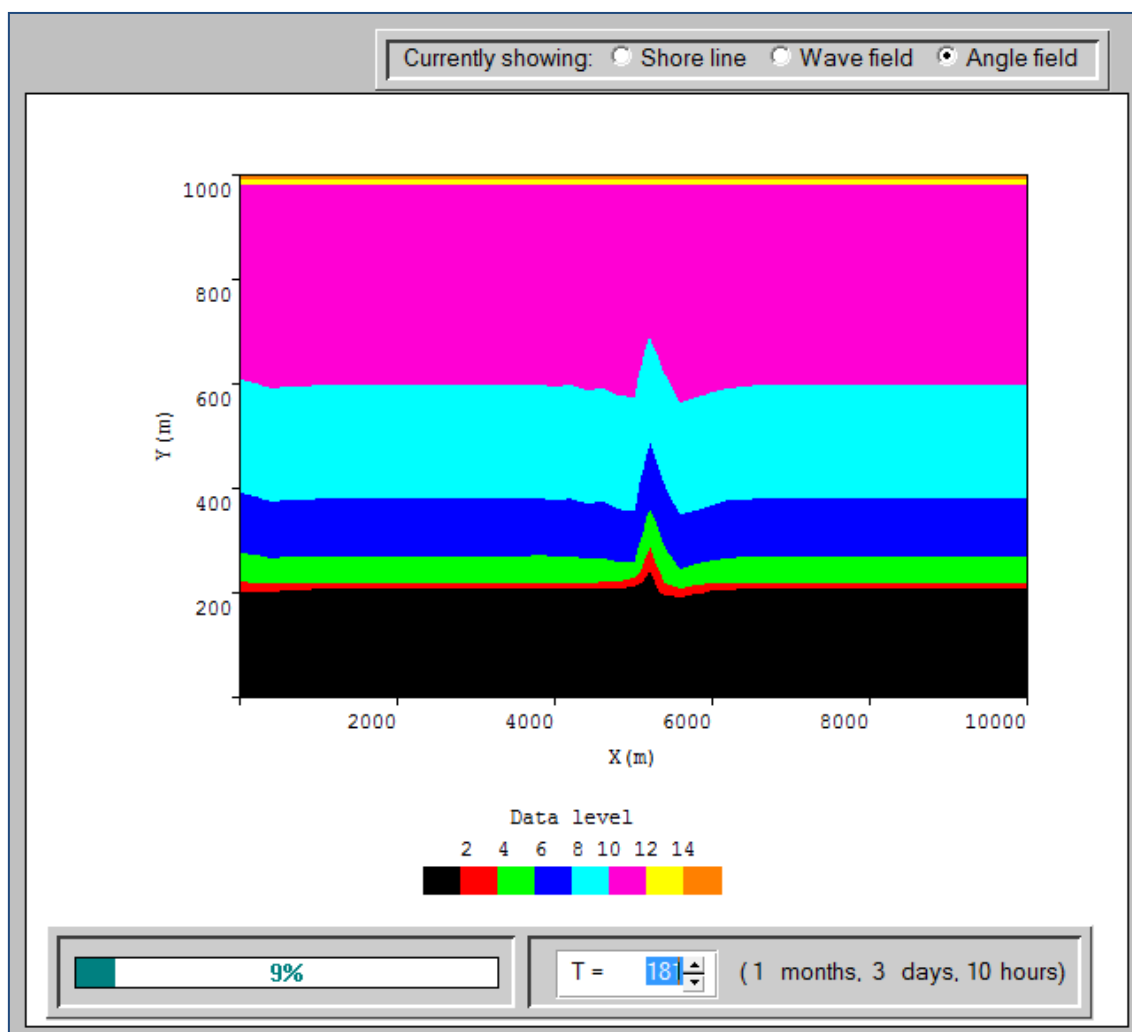


Fig. 4.2-q: Ejemplo de campo de ángulos de incidencia del oleaje en *ShorePlot*

5. Análisis de resultados

Data	
K	0.7
ρ_s	2.65
ρ_w	1
p	0.4
γ_b	0.5
μ	0.195
d_{50}	0.2
A	0.090
T	6
θ_0	15
H_0	1

Initial shore at: 200 (m) **Set**

Fig. 5-a: Parámetros predeterminados de ShorePlot

El objetivo de este capítulo es el de comprobar el funcionamiento del programa frente a distintas situaciones, comentar los resultados y compararlos cuando sea pertinente.

Todos los ensayos se realizarán con los parámetros predeterminados del programa, a excepción de aquellos específicamente así indicados en el ensayo en cuestión.

Además, en todos los ensayos se escogerá la opción de extremos amortiguados.

5.1. Confluencia de modelos

El primer análisis consiste en una comprobación conceptual. Partiendo de una línea de costa inicial totalmente recta (y batimetría paralela por definición), los resultados otorgados por los diferentes métodos de propagación deberían ser muy similares.

En el instante inicial ($t=0$), se observa lo siguiente:

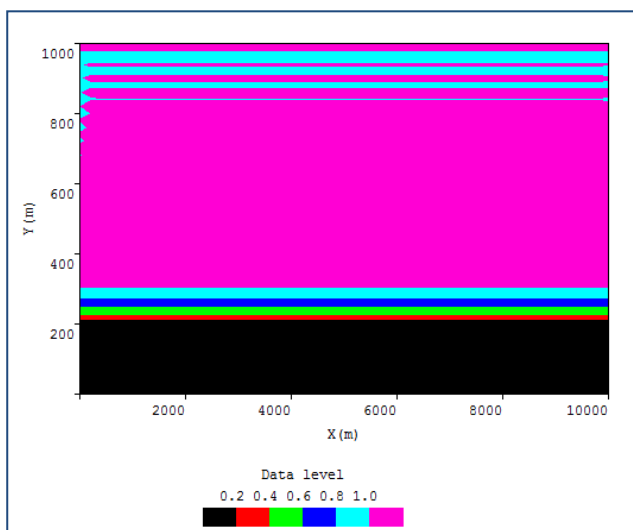


Fig. 5.1-a: Campo de alturas de ola. Modelo Q2D-morfo

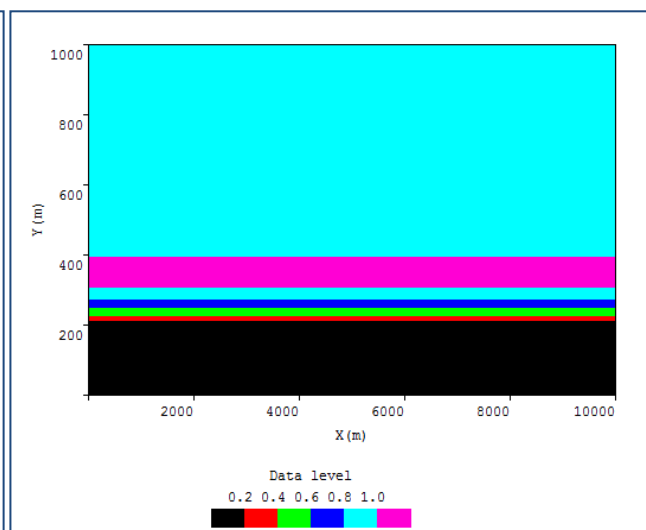


Fig. 5.1-b: Campo de alturas de ola. Modelo Snell

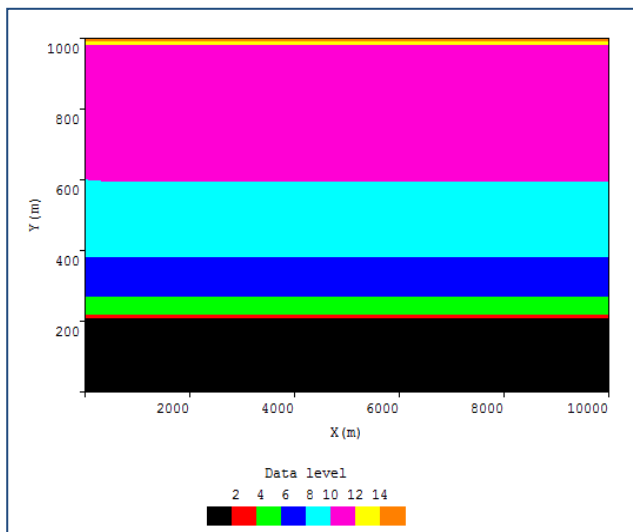


Fig. 5.1-c: Campo de ángulos. Modelo Q2D-morfo

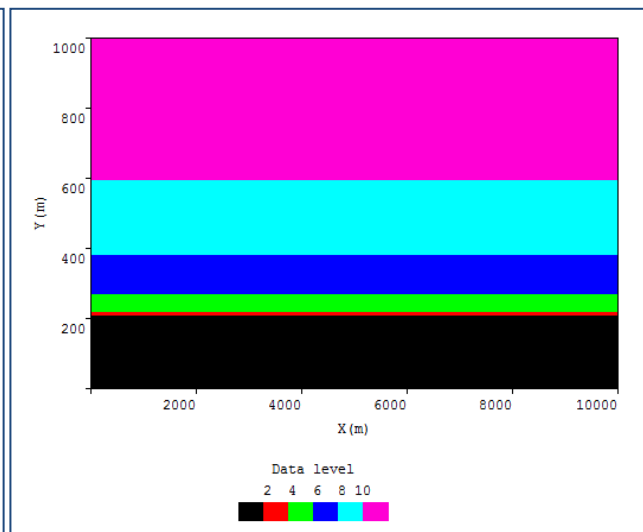


Fig. 5.1-d: Campo de ángulos. Modelo Snell

Pese a existir algunas ligeras diferencias entre ambos casos, se observa que el punto de rotura del oleaje se sitúa siempre alrededor de $y=300$ y que los valores de H_b y θ_b coinciden en todo el dominio.

Además, si se obtiene la línea de costa a los doce meses y en estas mismas condiciones, se observa lo siguiente:

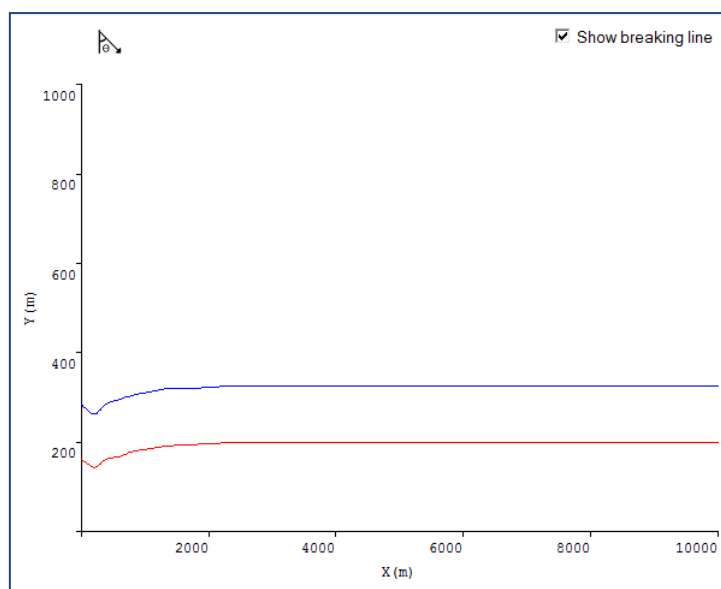


Fig. 5.1-e: Posición de línea de costa tras 12 meses. Modelo Q2D-morfo

En contraste, la línea proporcionada por el modelo Snell no presenta ningún cambio respecto a la situación inicial.

Esta diferencia puede explicarse como producto de un efecto acumulativo de las consideraciones tomadas en los extremos del modelo Q2D-morfo.

5.2. Espigón

Este ensayo consiste en el análisis de una playa inicialmente recta a la cual se le ha introducido un espigón.

Dicho espigón se encontrará exactamente en el punto central de la playa de estudio, tendrá una longitud/alcance de 450 m y su anchura será negligible.

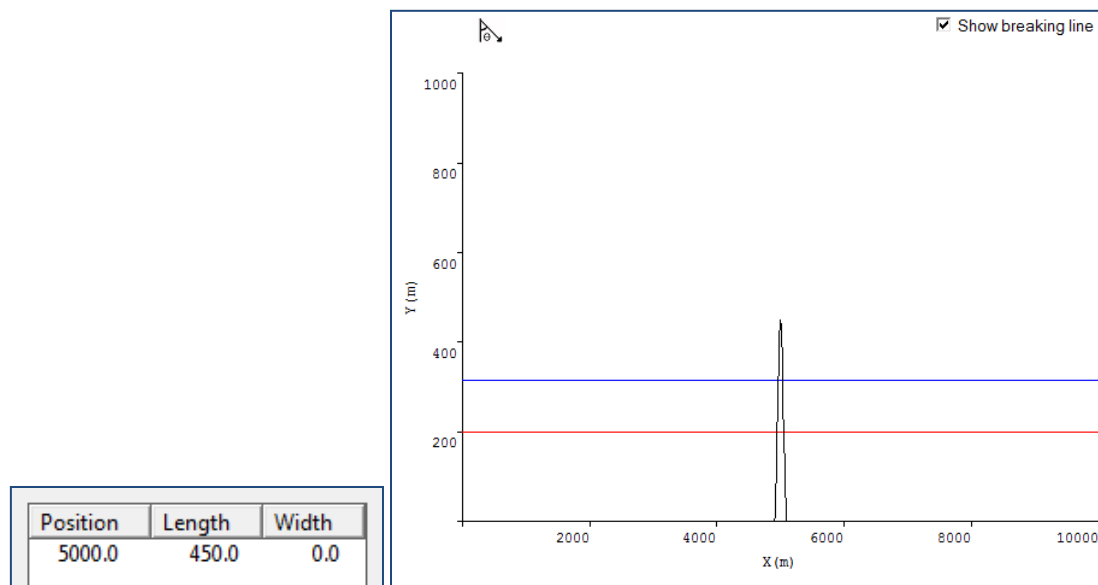


Fig. 5.2-a: Análisis: Espigón; Situación inicial

Esta situación se analizará en cuatro situaciones diferentes: $\theta_0=15^\circ$, $\theta_0=40^\circ$, $\theta_0=60^\circ$ y $\theta_0=80^\circ$; todas ellas desde el punto de vista de ambos modelos de propagación.

5.2.1. Ensayo de espigón, $\theta_0=15^\circ$

Situación de la costa medida tras un período de 12 meses.

Se observa una acumulación y erosión de sedimento a causa del espigón. La costa tiende a adoptar una orientación perpendicular al oleaje incidente (15°).

En la simulación obtenida por el modelo Q2D-morfo, se observa también una erosión en el extremo izquierdo de la playa. Dicho fenómeno se atribuye a una acumulación progresiva de errores debida a las consideraciones tomadas en la implementación del modelo.

Salvando la situación antes citada, ambos modelos coinciden de forma razonable.

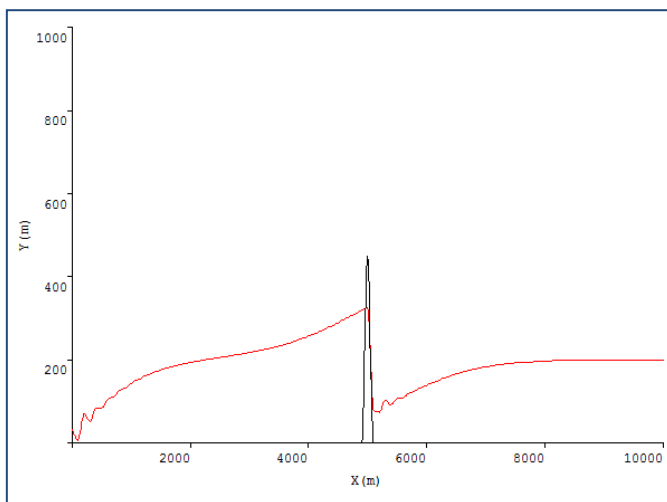


Fig. 5.2.1-a: Línea de costa; 15° , 12 meses. Modelo Q2D-m

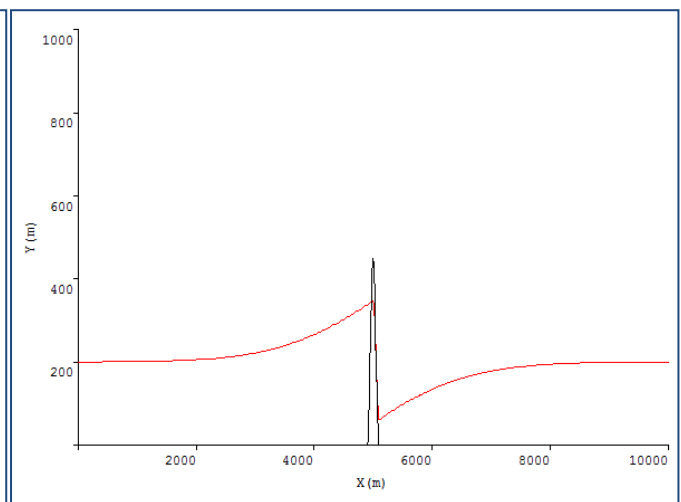


Fig. 5.2.1-b: Línea de costa; 15° , 12 meses. Modelo Snell

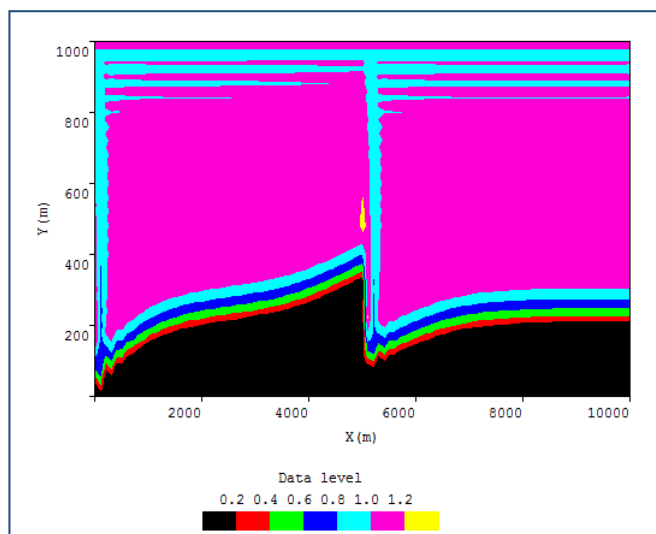


Fig. 5.2.1-c: Alturas de ola; 15° , 12 meses. Modelo Q2D-m

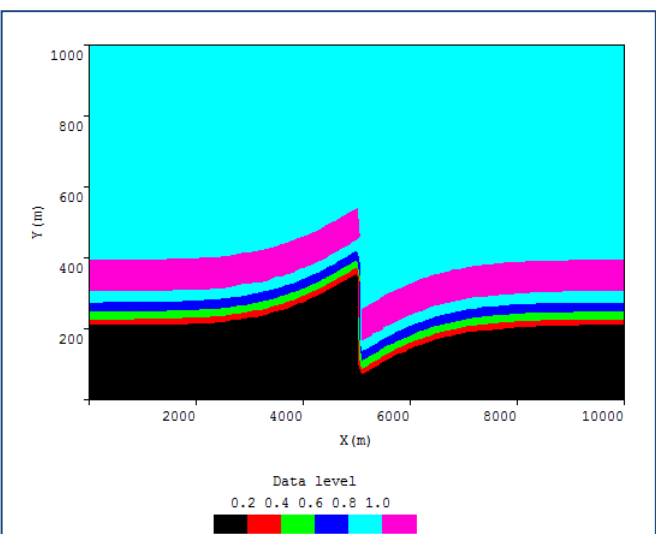


Fig. 5.2.1-d: Alturas de ola; 15° , 12 meses. Modelo Snell

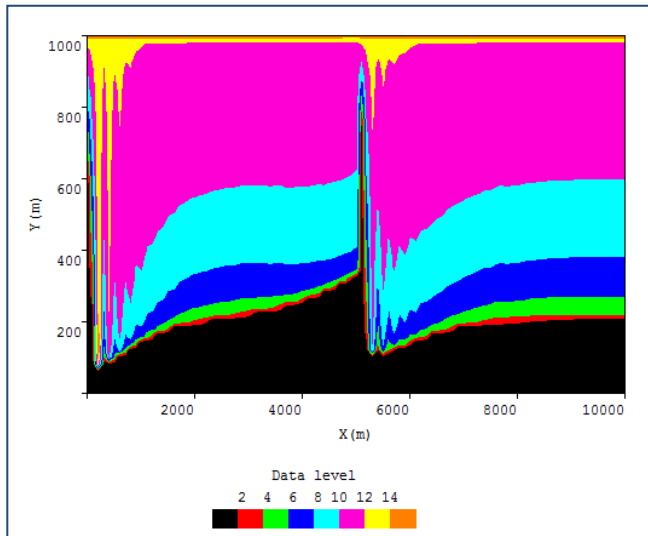


Fig. 5.2.1-e: Ángulos; 15°, 12 meses. Modelo Q2D-morfo

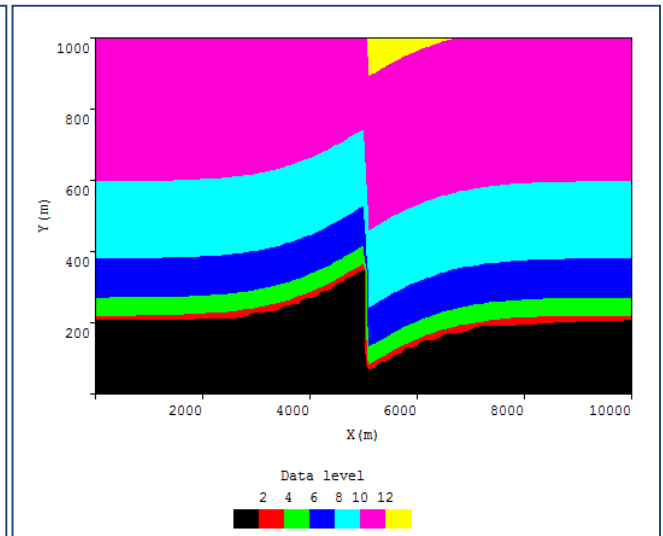


Fig. 5.2.1-f: Ángulos; 15°, 12 meses. Modelo Snell

5.2.2. Ensayo de espigón, $\theta_0=15^\circ$

Situación de la costa medida tras un período de 24 meses.

Continúan la acumulación de sedimento y la erosión a causa del espigón. La costa tiende a adoptar una orientación perpendicular al oleaje incidente (15°).

En la simulación obtenida por el modelo Q2D-morfo, de nuevo se observa erosión en el extremo izquierdo de la playa. Dicho fenómeno se atribuye a una acumulación progresiva de errores debida a las consideraciones tomadas en la implementación del modelo.

Salvando la situación antes citada, ambos modelos coinciden de forma razonable.

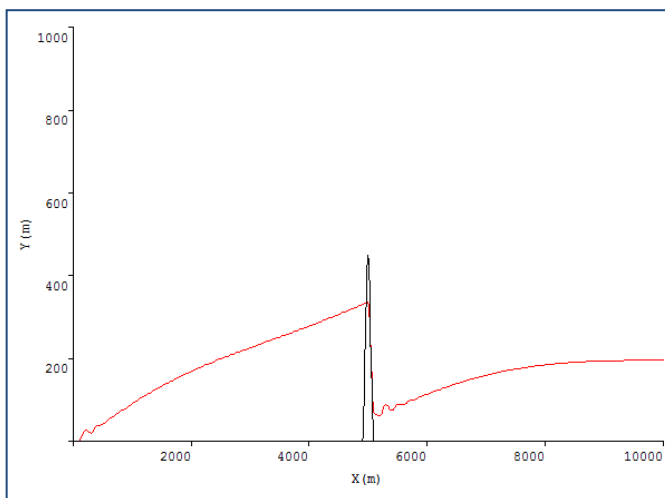


Fig. 5.2.2-a: Línea de costa; 15°, 24 meses. Modelo Q2D-m

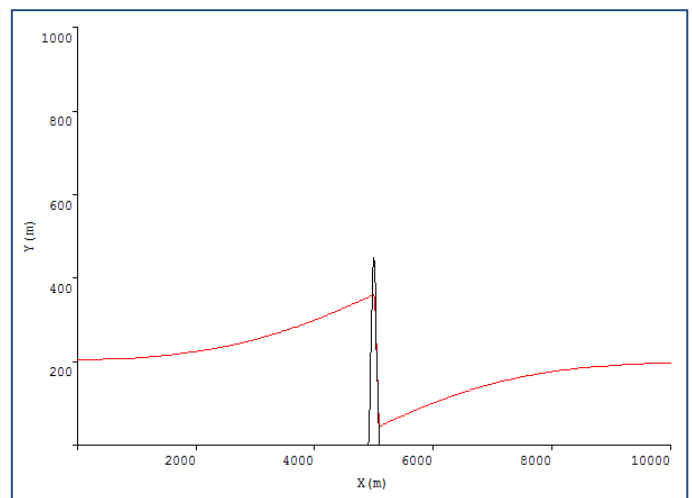


Fig. 5.2.2-b: Línea de costa; 15°, 24 meses. Modelo Snell

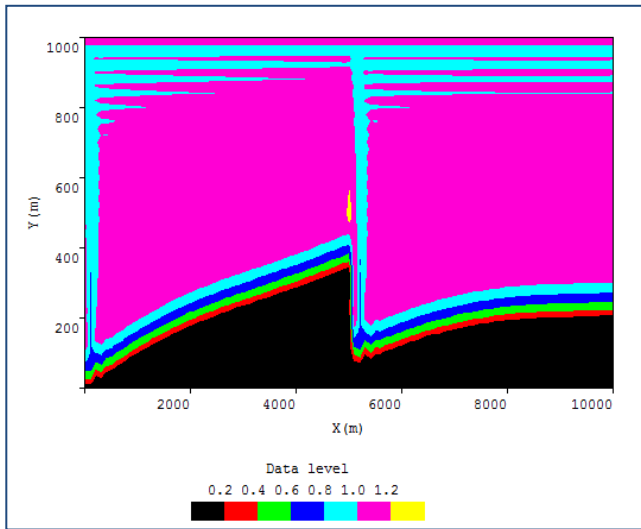


Fig. 5.2.2-c: Alturas de ola; 15°, 24 meses. Modelo Q2D-m

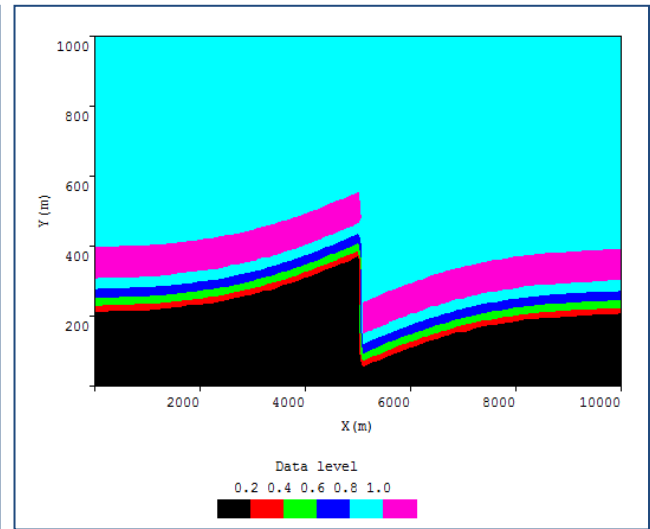


Fig. 5.2.2-d: Alturas de ola; 15°, 24 meses. Modelo Snell

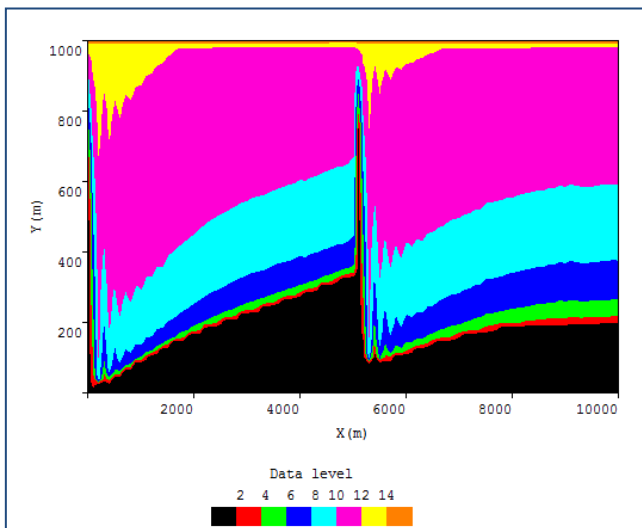


Fig. 5.2.2-e: Ángulos; 15°, 24 meses. Modelo Q2D-morfo

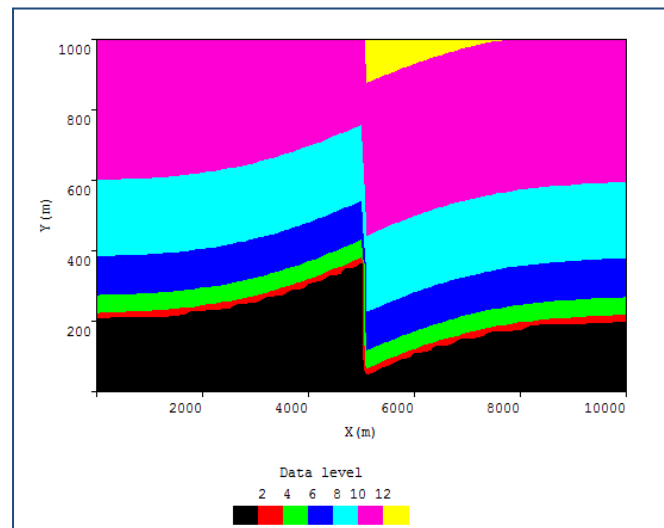


Fig. 5.2.2-f: Ángulos; 15°, 24 meses. Modelo Snell

5.2.3. Ensayo de espigón, $\theta_0=40^\circ$

Situación de la costa medida tras un período de 3 meses y 20 días.

Se observa una acumulación y erosión de sedimento a causa del espigón. La costa tiende a adoptar una orientación perpendicular al oleaje incidente (40°); y lo hace más deprisa según el modelo Q2D-morfo que con el modelo Snell.

En la simulación obtenida por el modelo Q2D-morfo, de nuevo se observa erosión en el extremo izquierdo de la playa. Dicho fenómeno se atribuye a una acumulación progresiva de errores debida a las consideraciones tomadas en la implementación del modelo.

La evolución del ángulo de incidencia coincide de forma razonable, pero la propagación de las alturas de ola otorga resultados ligeramente distintos (mayores alturas en el modelo Q2D-morfo).

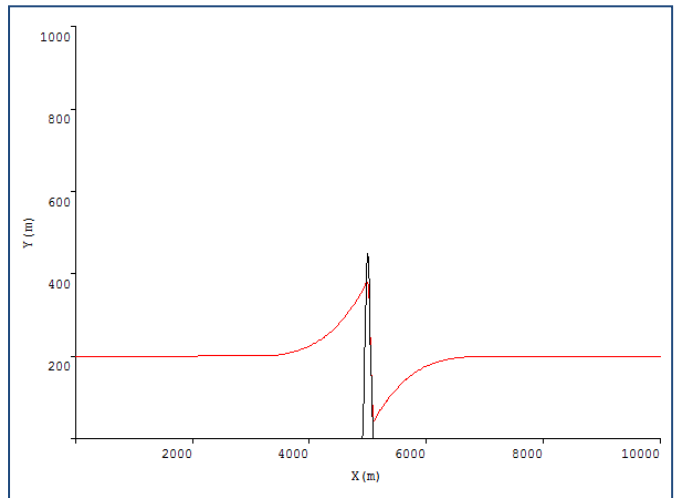
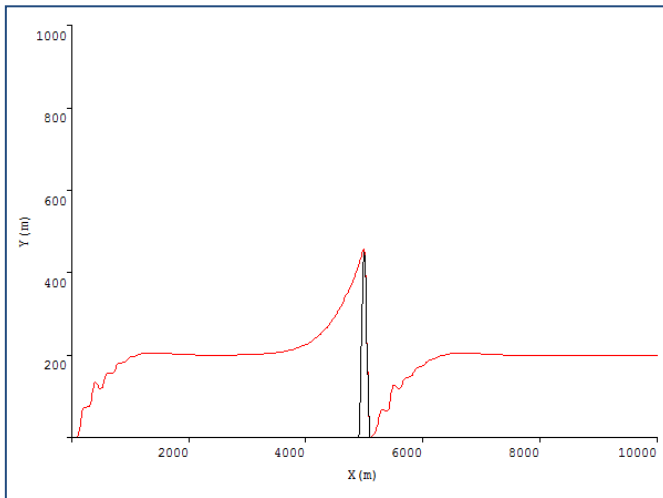


Fig. 5.2.3-a: Línea de costa; 40°, 3.7 meses. Modelo Q2D-m

Fig. 5.2.3-b: Línea de costa; 49°, 3.7 meses. Modelo Snell

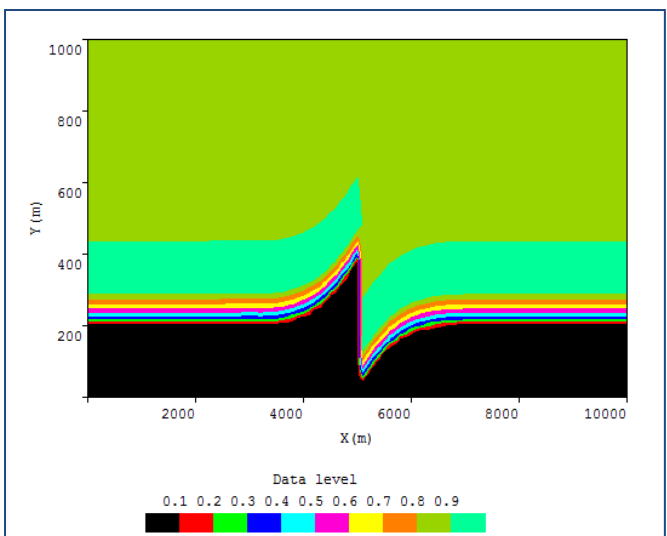
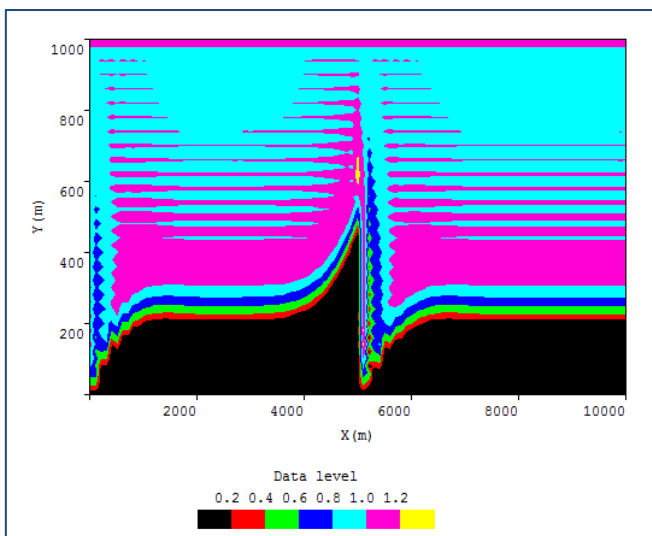


Fig. 5.2.3-c: Alturas de ola; 40°, 3.7 meses. Modelo Q2D-m

Fig. 5.2.3-d: Alturas de ola; 40°, 3.7 meses. Modelo Snell

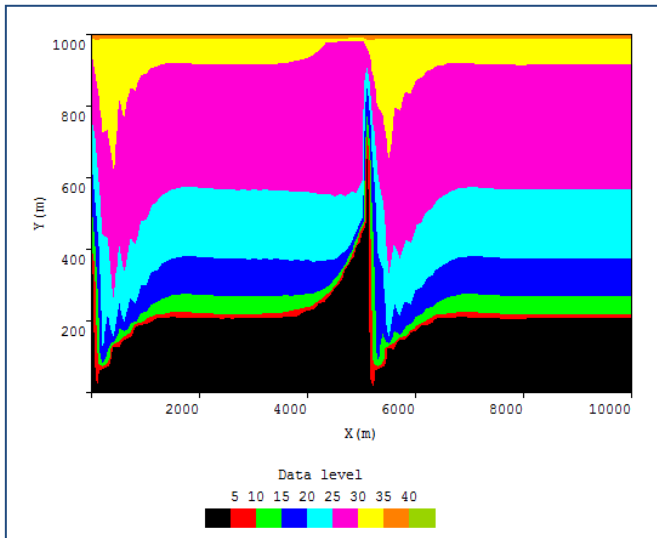


Fig. 5.2.3-e: Ángulos; 40°, 3.7 meses. Modelo Q2D-morfo

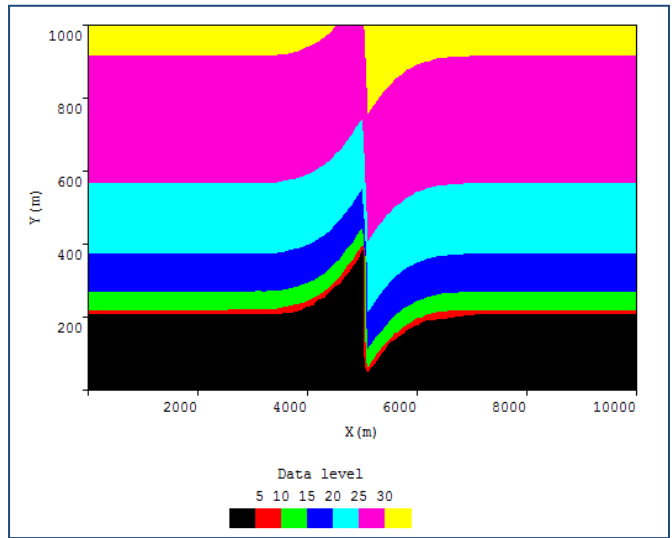


Fig. 5.2.3-f: Ángulos; 40°, 3.7 meses. Modelo Snell

5.2.4. Ensayo de espigón, $\theta_0=40^\circ$

Situación de la costa medida tras un período de 12 meses.

El modelo Snell muestra un rebase del espigón. Deja de acumularse sedimento y aparece flujo de sedimento hacia el otro lado del espigón.

El modelo Q2D-morfo parece alcanzar un punto de inestabilidad, provocando una acumulación incontrolada de sedimento junto al espigón.

De nuevo, en la simulación obtenida por el modelo Q2D-morfo, se observa erosión en el extremo izquierdo de la playa. Dicho fenómeno se atribuye a una acumulación progresiva de errores debida a las consideraciones tomadas en la implementación del modelo.

La evolución del ángulo de incidencia coincide de forma razonable, pero la propagación de las alturas de ola otorga resultados ligeramente distintos (mayores alturas en el modelo Q2D-morfo).

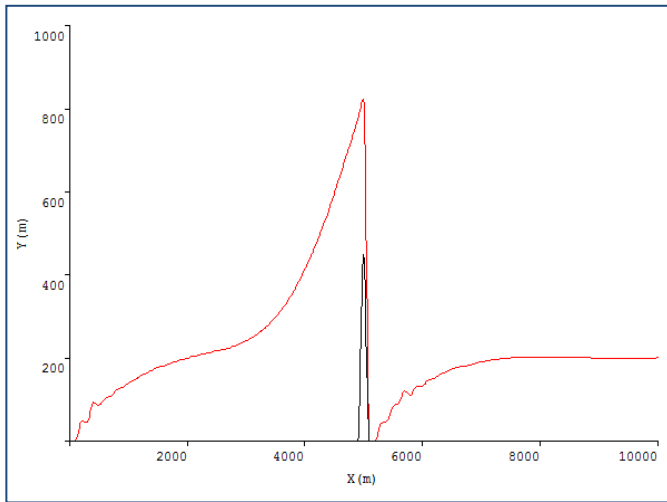


Fig. 5.2.4-a: Línea de costa; 40°, 12 meses. Modelo Q2D-m

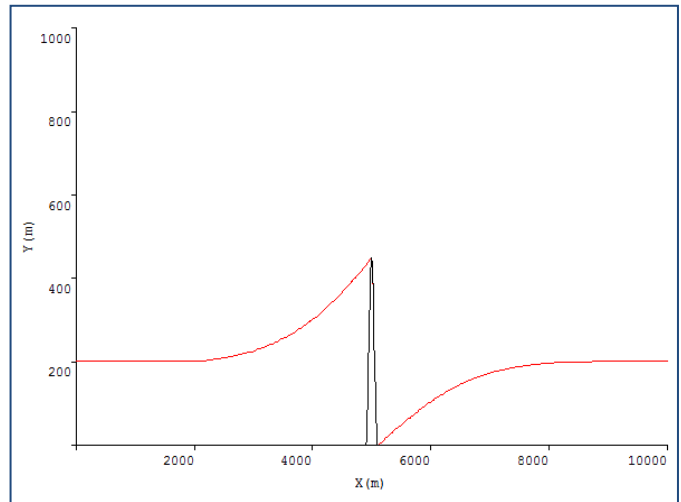


Fig. 5.2.4-b: Línea de costa; 40°, 12 meses. Modelo Snell

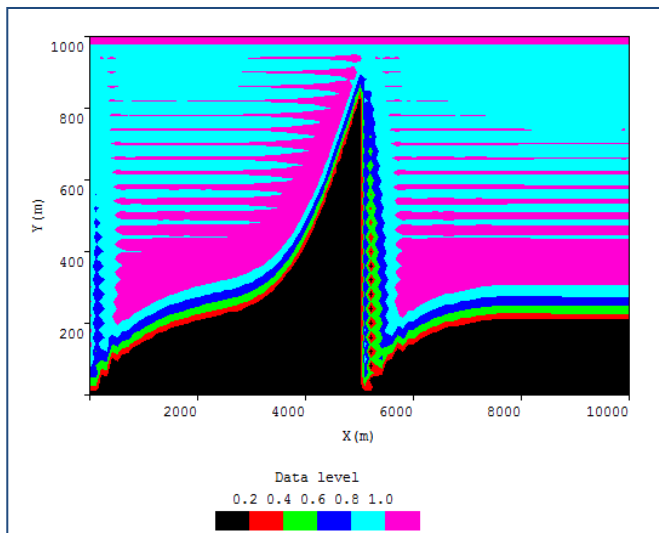


Fig. 5.2.4-c: Alturas de ola; 40°, 12 meses. Modelo Q2D-m

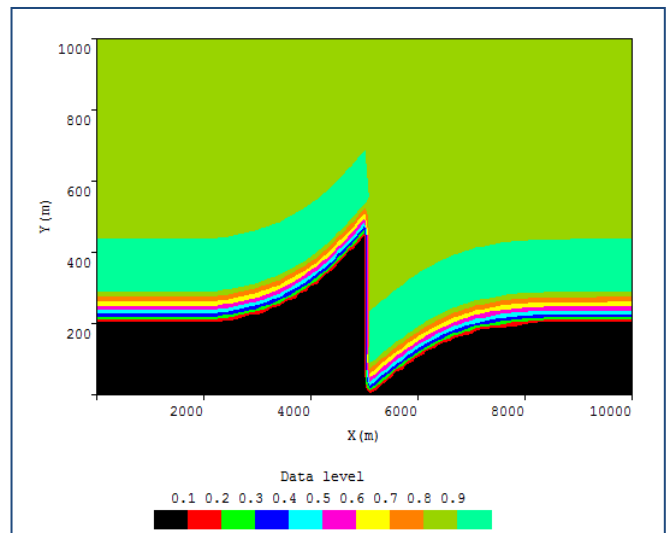


Fig. 5.2.4-d: Alturas de ola; 40°, 12 meses. Modelo Snell

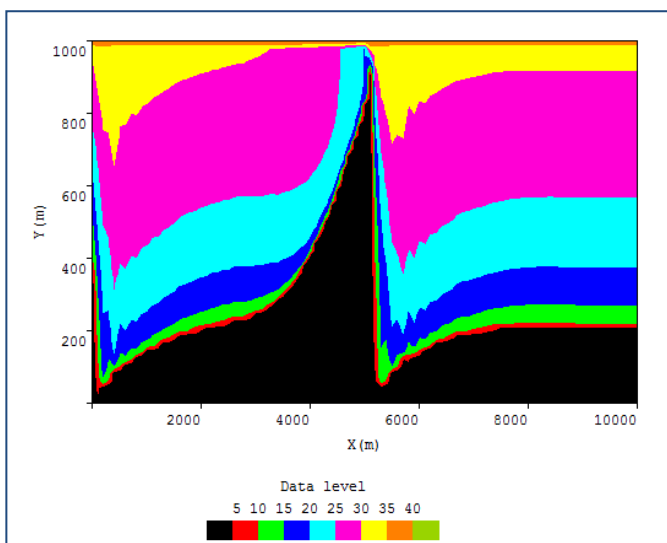


Fig. 5.2.4-e: Ángulos; 40°, 12 meses. Modelo Q2D-morfo

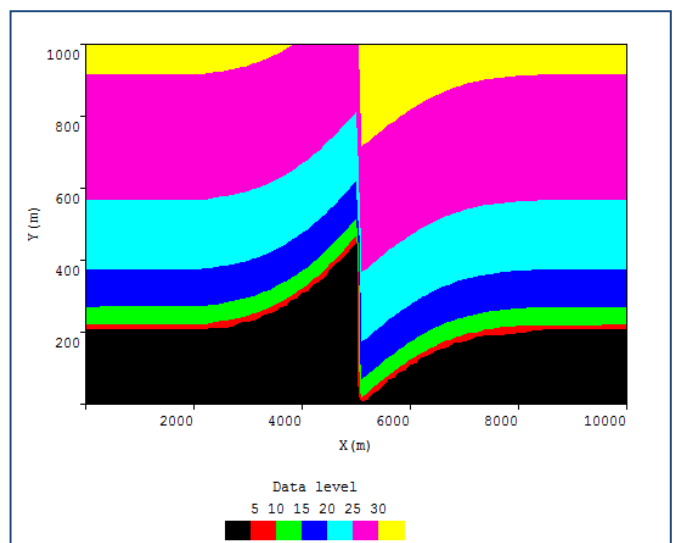


Fig. 5.2.4-f: Ángulos; 40°, 12 meses. Modelo Snell

5.2.5. Ensayo de espigón, $\theta_0=60^\circ$

Situación de la costa medida tras un período de 1 mes y 7 días.

Se observa una acumulación y erosión de sedimento a causa del espigón. La costa tiende a adoptar una orientación perpendicular al oleaje incidente (60°); y lo hace más deprisa según el modelo Q2D-morfo que con el modelo Snell.

En la simulación obtenida por el modelo Q2D-morfo, aparece un conjunto de pequeñas inestabilidades en el extremo izquierdo de la playa.

Tanto los valores del ángulo de incidencia como la propagación de las alturas de ola otorgan resultados ligeramente distintos (mayores alturas en el modelo Q2D-morfo).

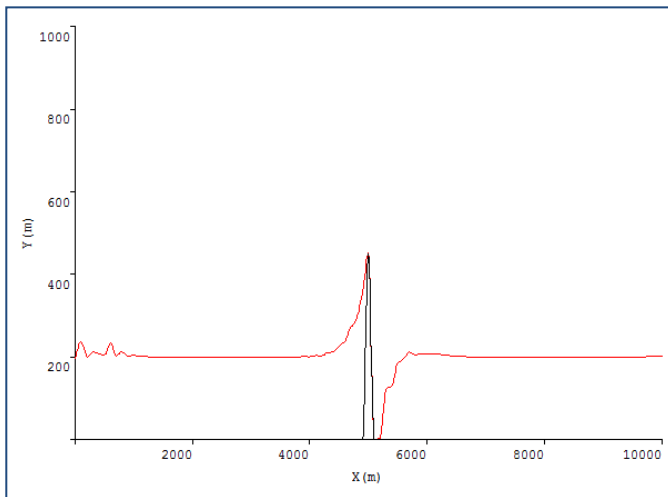


Fig. 5.2.5-a: Línea de costa; 60° , 1.3 meses. Modelo Q2D-m

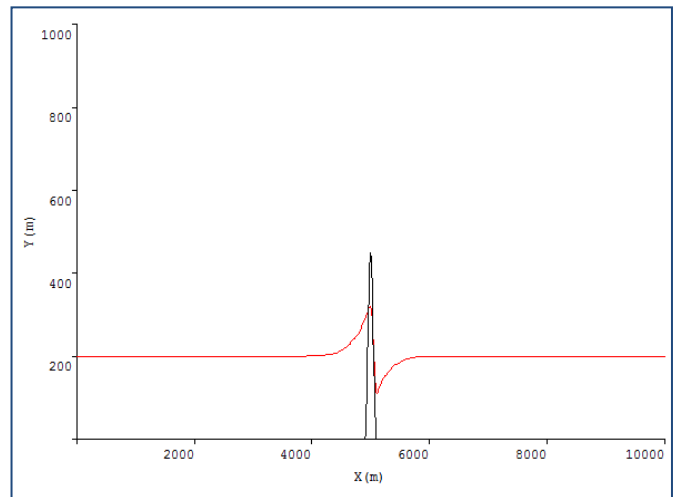


Fig. 5.2.5-b: Línea de costa; 60° , 1.3 meses. Modelo Snell

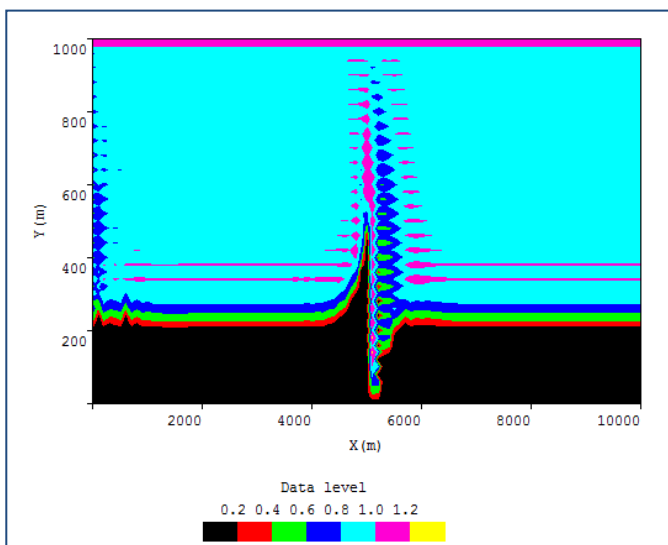


Fig. 5.2.5-c: Alturas de ola; 60° , 1.3 meses. Modelo Q2D-m

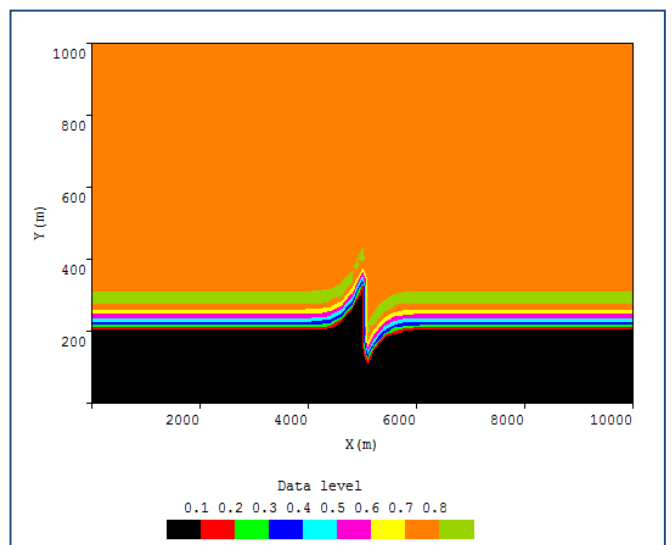


Fig. 5.2.5-d: Alturas de ola; 60° , 1.3 meses. Modelo Snell

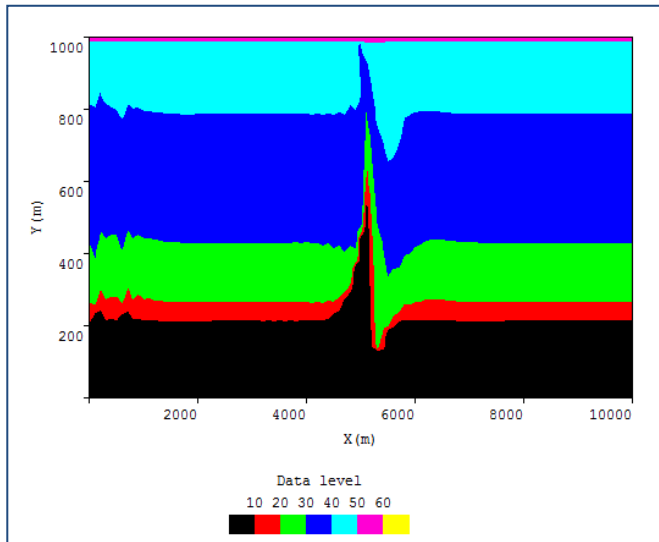


Fig. 5.2.5-e: Ángulos; 60°, 1.3 meses. Modelo Q2D-morfo

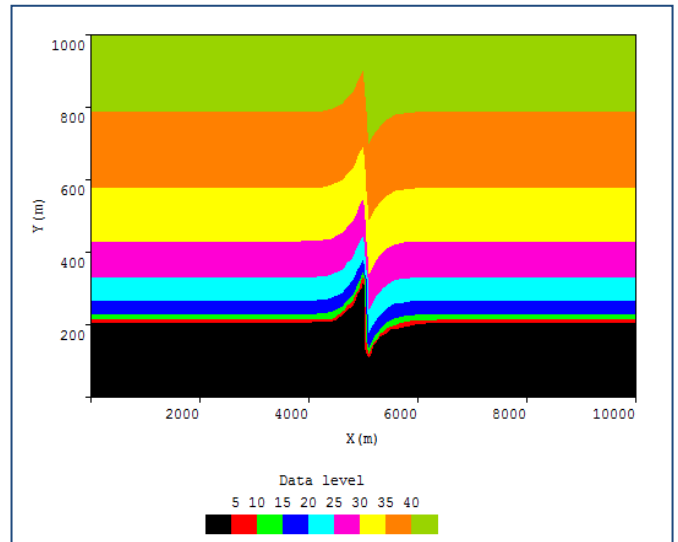


Fig. 5.2.5-f: Ángulos; 60°, 1.3 meses. Modelo Snell

5.2.6. Ensayo de espigón, $\theta_0=60^\circ$

Situación de la costa medida tras un período de 12 meses.

Continúan la acumulación y erosión de sedimento a causa del espigón. La costa tiende a adoptar una orientación perpendicular al oleaje incidente (60°); y lo hace más deprisa según el modelo Q2D-morfo que con el modelo Snell.

En el modelo Q2D-morfo parece alcanzarse un punto de inestabilidad, provocando una acumulación incontrolada de sedimento junto al espigón.

En la simulación obtenida por el modelo Q2D-morfo, aparece una acumulación de sedimento en el extremo izquierdo de la playa. Este fenómeno podría indicar la presencia de inestabilidades, que incrementan el efecto de cualquier pequeña perturbación.

Tanto los valores del ángulo de incidencia como la propagación de las alturas de ola otorgan resultados distintos (mayores alturas en el modelo Q2D-morfo).

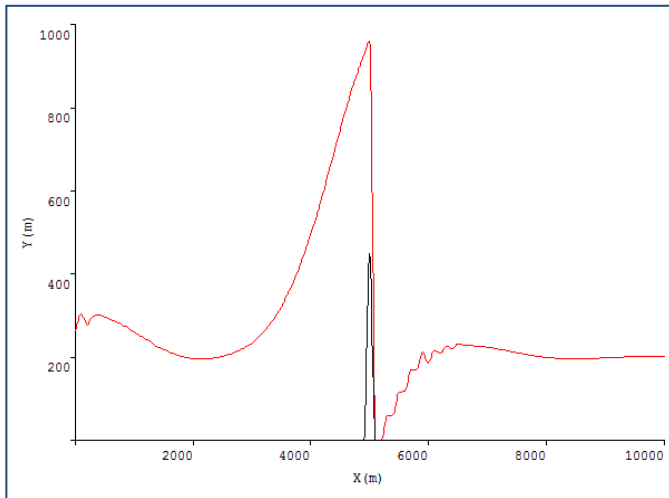


Fig. 5.2.6-a: Línea de costa; 60°, 12 meses. Modelo Q2D-m

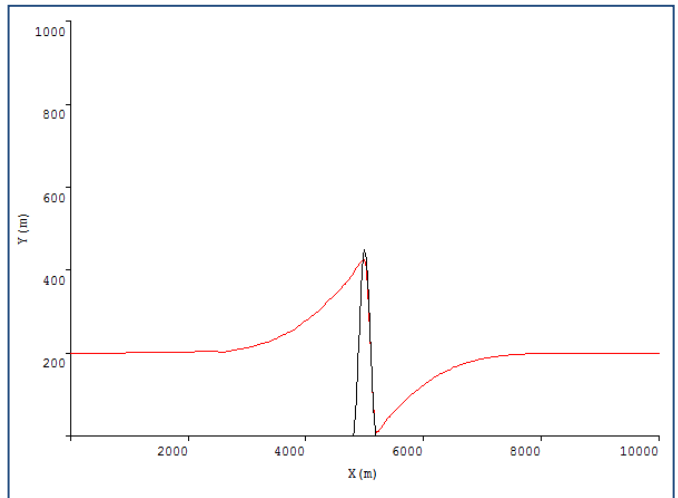


Fig. 5.2.6-b: Línea de costa; 60°, 12 meses. Modelo Snell

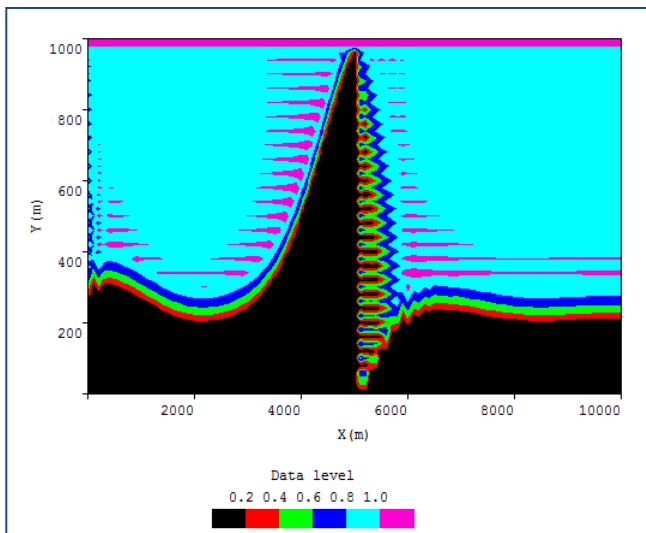


Fig. 5.2.6-c: Alturas de ola; 60°, 12 meses. Modelo Q2D-m

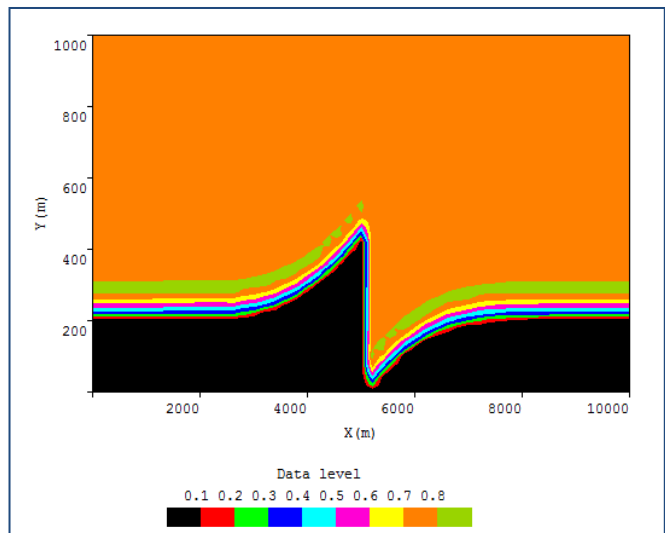


Fig. 5.2.6-d: Alturas de ola; 60°, 12 meses. Modelo Snell

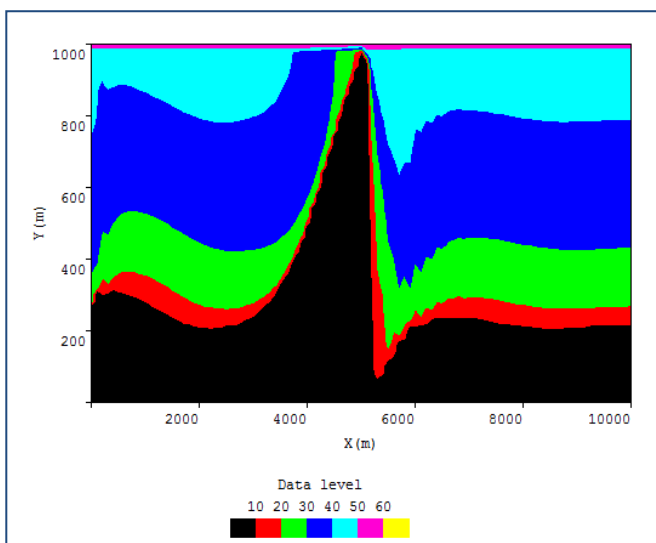


Fig. 5.2.6-e: Ángulos; 60°, 12 meses. Modelo Q2D-morfo

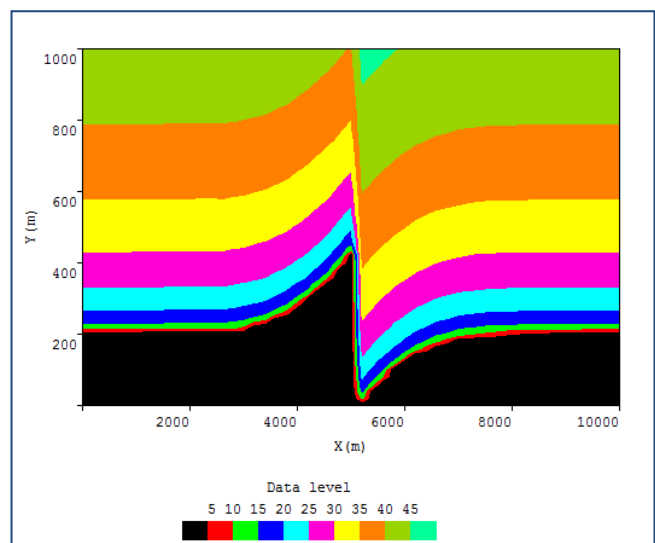


Fig. 5.2.6-f: Ángulos; 60°, 12 meses. Modelo Snell

5.2.7. Ensayo de espigón, $\theta_0=80^\circ$

Situación de la costa medida tras un período de 12 meses.

Se aprecian una acumulación y erosión de sedimento a causa del espigón. La costa tiende a adoptar una orientación perpendicular al oleaje incidente (80°); y lo hace más deprisa según el modelo Q2D-morfo que con el modelo Snell.

En la simulación obtenida por el modelo Q2D-morfo, aparece el fenómeno de inestabilidad. Cualquier pequeña perturbación en la costa se ve incrementada, dando lugar a picos incontrolados.

Tanto los valores del ángulo de incidencia como la propagación de las alturas de ola otorgan resultados distintos (mayores alturas en el modelo Q2D-morfo).

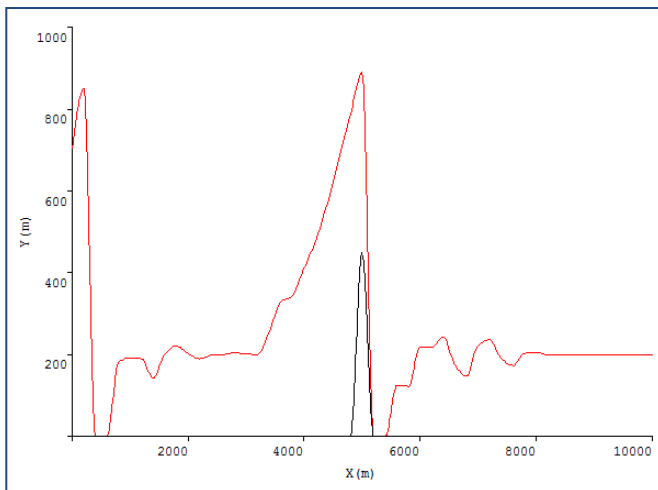


Fig. 5.2.7-a: Línea de costa; 80° , 12 meses. Modelo Q2D-m

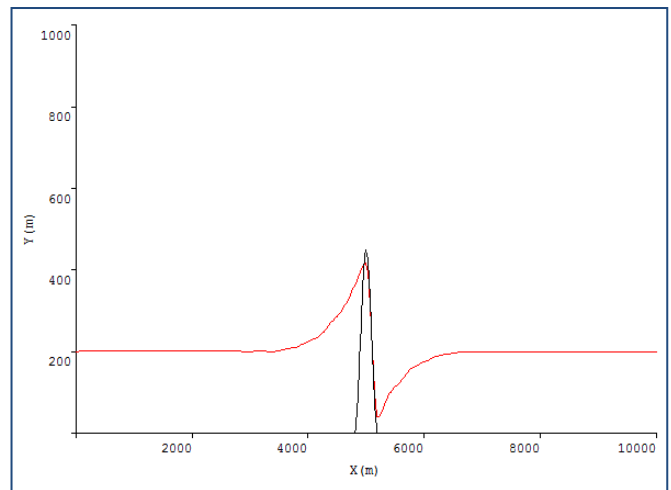


Fig. 5.2.7-b: Línea de costa; 80° , 12 meses. Modelo Snell

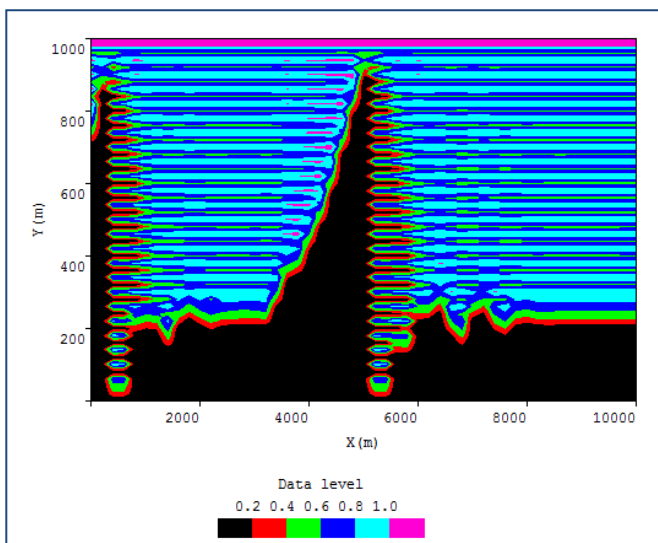


Fig. 5.2.7-c: Alturas de ola; 80° , 12 meses. Modelo Q2D-m

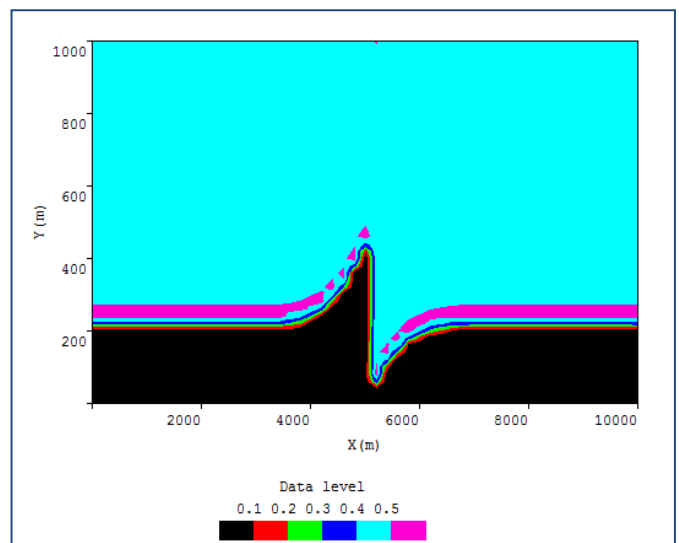


Fig. 5.2.7-d: Alturas de ola; 80° , 12 meses. Modelo Snell

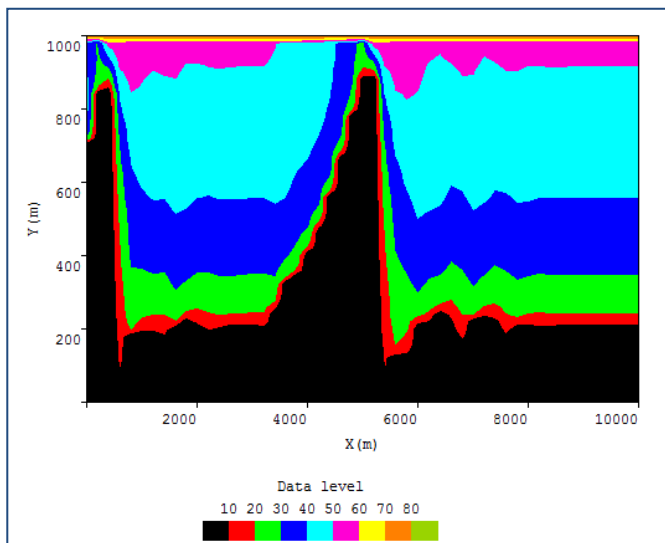


Fig. 5.2.7-e: Ángulos; 80°, 12 meses. Modelo Q2D-morfo

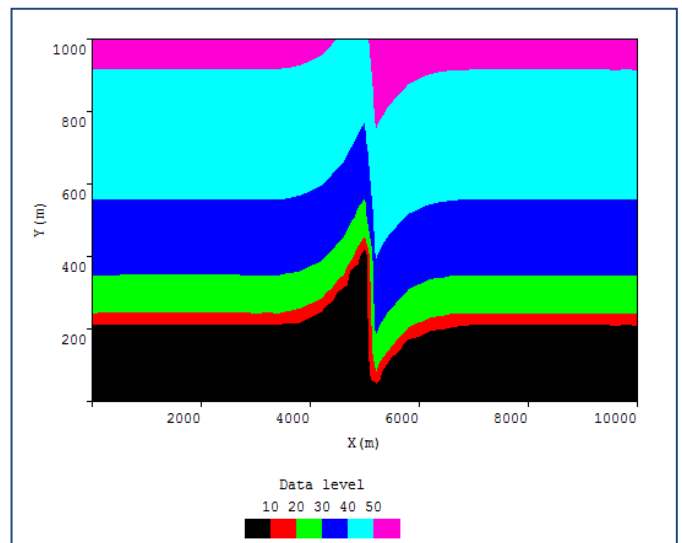
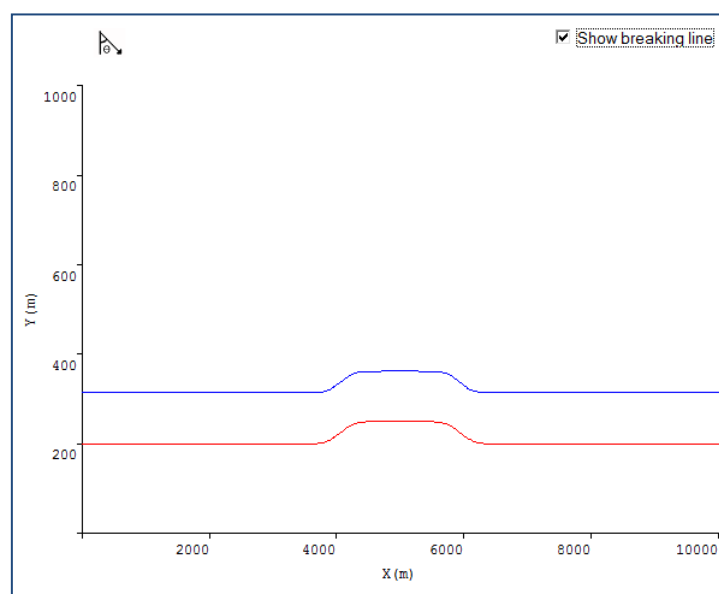


Fig. 5.2.7-f: Ángulos; 80°, 12 meses. Modelo Snell

5.3. “Nourishment”

Este ensayo consiste en el análisis de una playa inicialmente recta a la cual se le ha añadido una cantidad de sedimento (“Nourishment”) en la zona central.

Esta alteración en la línea de costa se adentra aproximadamente 50 m en el agua y se extiende entre 500 m y 2000 m en longitud.

Fig. 5.2-a: Análisis: *Nourishment*; Situación inicial

Esta situación se analizará en cuatro situaciones diferentes: $\theta_0=0^\circ$, $\theta_0=30^\circ$, $\theta_0=60^\circ$ y $\theta_0=80^\circ$; todas ellas desde el punto de vista de ambos modelos de propagación.

5.3.1. Ensayo “*Nourishment*”, $\theta_0=0^\circ$

Situación de la costa medida tras un período de 12 meses.

Ambos casos presentan la difusión de la perturbación de forma homogénea y a una velocidad muy similar.

Tanto los valores del ángulo de incidencia como la propagación de las alturas de ola otorgan resultados muy similares. El modelo Q2D-morfo, sin embargo, presenta unas pequeñas desviaciones en el campo de ángulos.

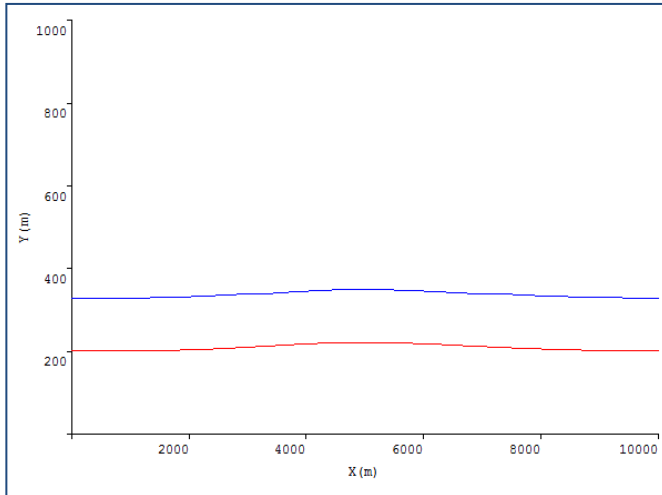


Fig. 5.3.1-a: Línea de costa; 0° , 12 meses. Modelo Q2D-m

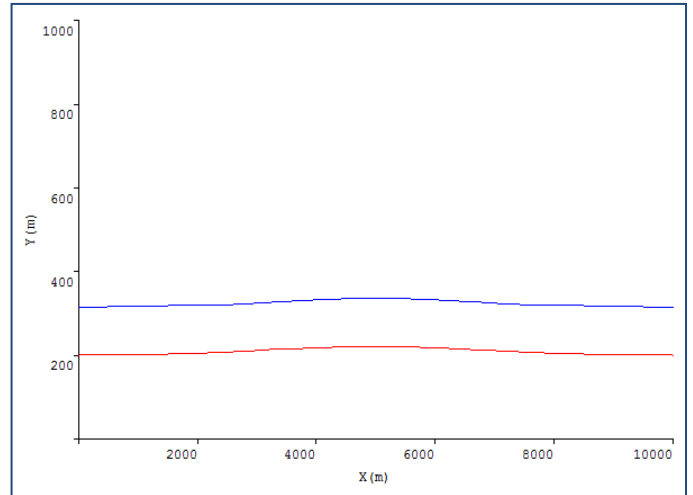


Fig. 5.3.1-b: Línea de costa; 0° , 12 meses. Modelo Snell

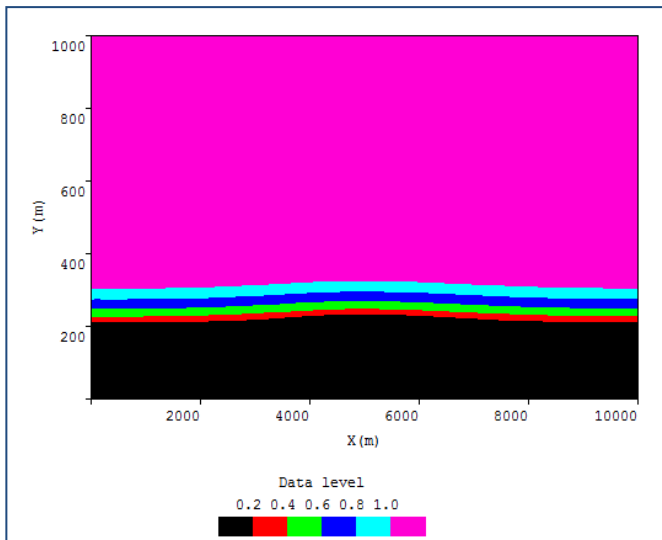


Fig. 5.3.1-c: Alturas de ola; 0° , 12 meses. Modelo Q2D-m

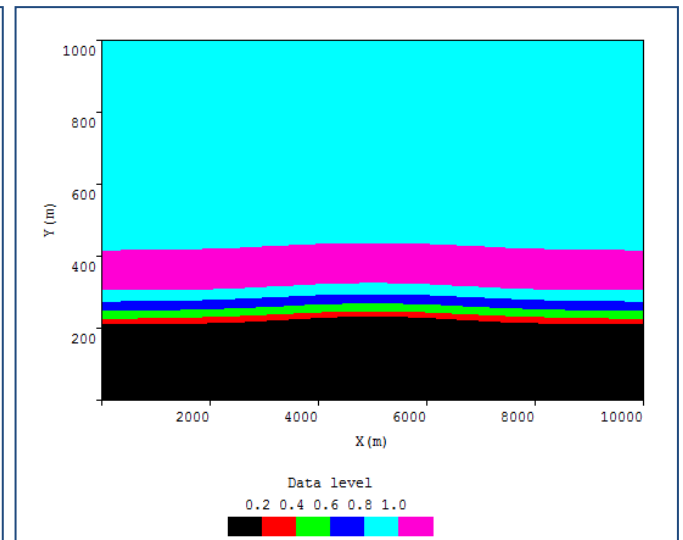


Fig. 5.3.1-d: Alturas de ola; 0° , 12 meses. Modelo Snell

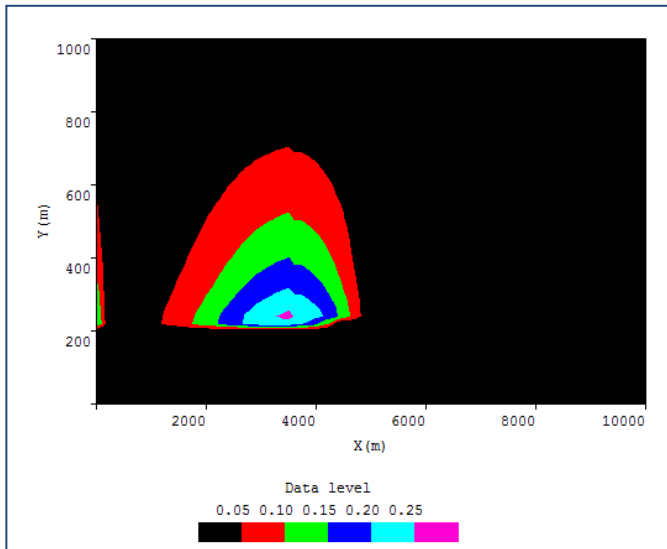


Fig. 5.3.1-e: Ángulos; 0°, 12 meses. Modelo Q2D-morfo

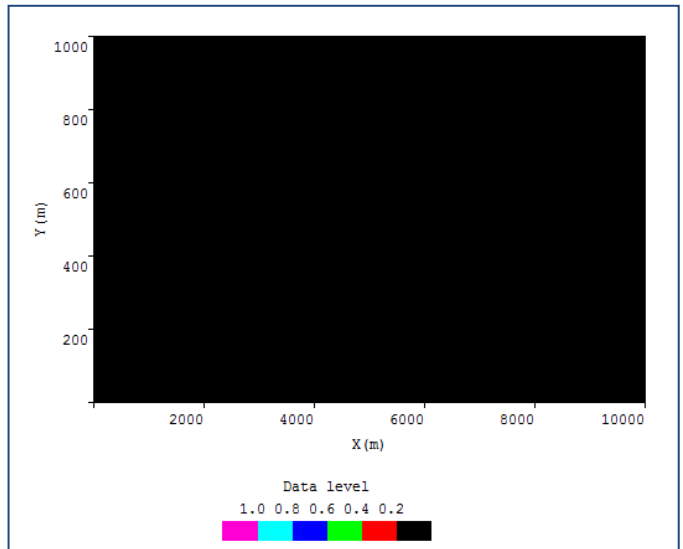


Fig. 5.3.1-f: Ángulos; 0°, 12 meses. Modelo Snell

5.3.2. Ensayo “*Nourishment*”, $\theta_0=30^\circ$

Situación de la costa medida tras un período de 12 meses.

Ambos casos presentan la difusión de la perturbación de forma homogénea y a una velocidad muy similar.

En la simulación obtenida por el modelo Q2D-morfo, sin embargo, se observa erosión en el extremo izquierdo de la playa. Dicho fenómeno se atribuye a una acumulación progresiva de errores debida a las consideraciones tomadas en la implementación del modelo.

Tanto los valores de la propagación de las alturas de ola como los del campo de ángulos otorgan resultados razonablemente similares.

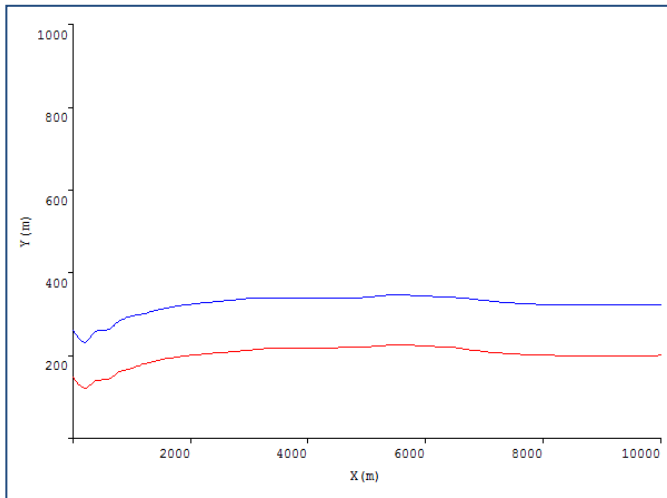


Fig. 5.3.2-a: Línea de costa; 30°, 12 meses. Modelo Q2D-m

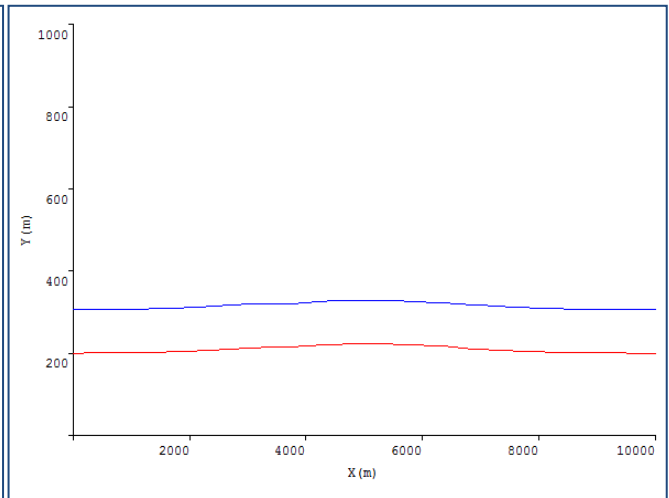


Fig. 5.3.2-b: Línea de costa; 30°, 12 meses. Modelo Snell

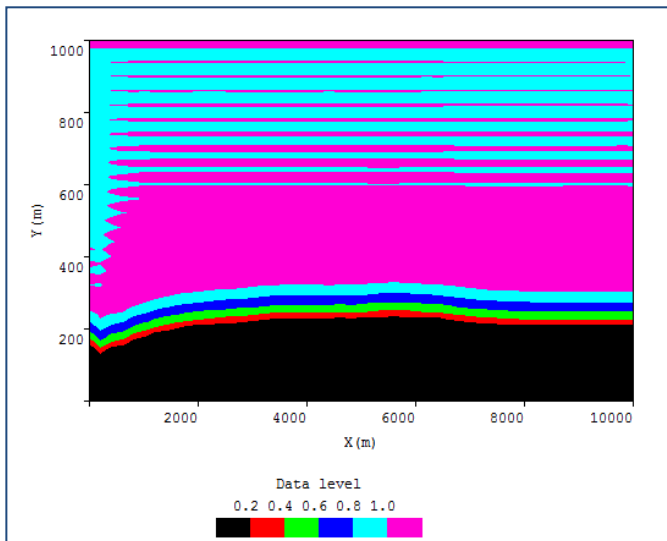


Fig. 5.3.2-c: Alturas de ola; 30°, 12 meses. Modelo Q2D-m

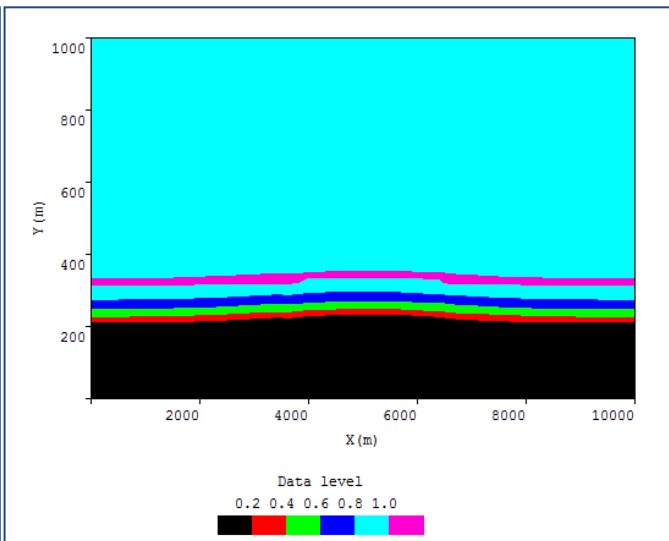


Fig. 5.3.2-d: Alturas de ola; 30°, 12 meses. Modelo Snell

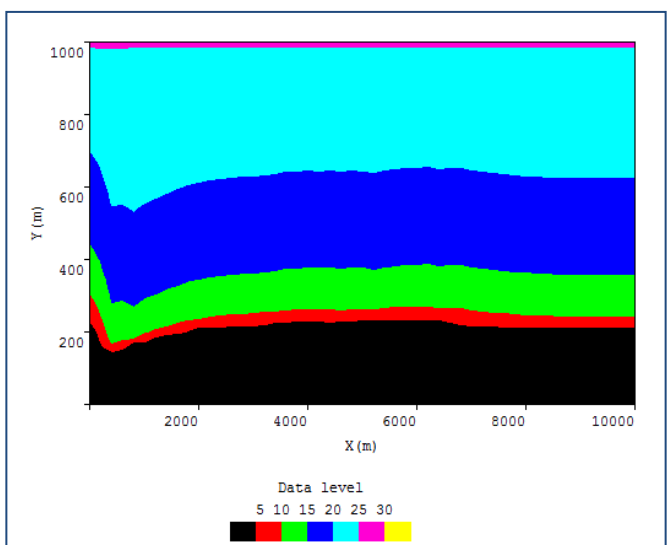


Fig. 5.3.2-e: Ángulos; 30°, 12 meses. Modelo Q2D-m

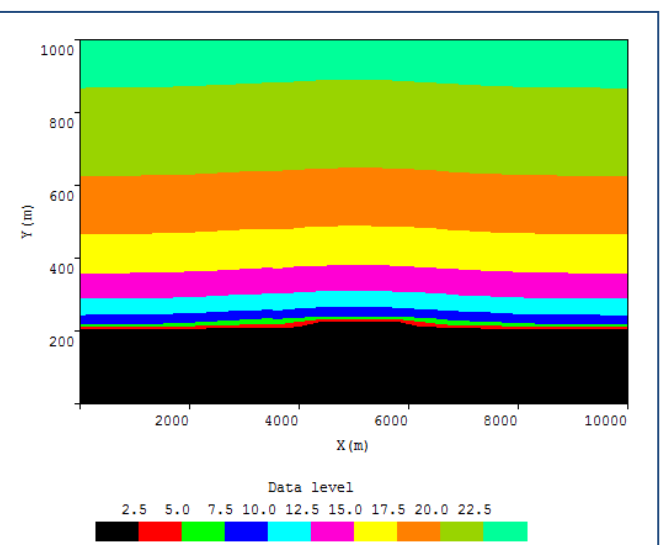


Fig. 5.3.2-f: Ángulos; 30°, 12 meses. Modelo Snell

5.3.3. Ensayo “*Nourishment*”, $\theta_0=60^\circ$

Situación de la costa medida tras un período de 12 meses.

Ambos casos presentan la difusión de la perturbación de forma homogénea y a una velocidad muy similar.

En la simulación obtenida por el modelo Q2D-morfo, aparece una acumulación de sedimento en el extremo izquierdo de la playa. Este fenómeno podría indicar la presencia de inestabilidades, que incrementan el efecto de cualquier pequeña perturbación.

El campo de ángulos mantiene una similitud razonable. Por otro lado, el campo de alturas de ola presenta un grado de variación no despreciable.

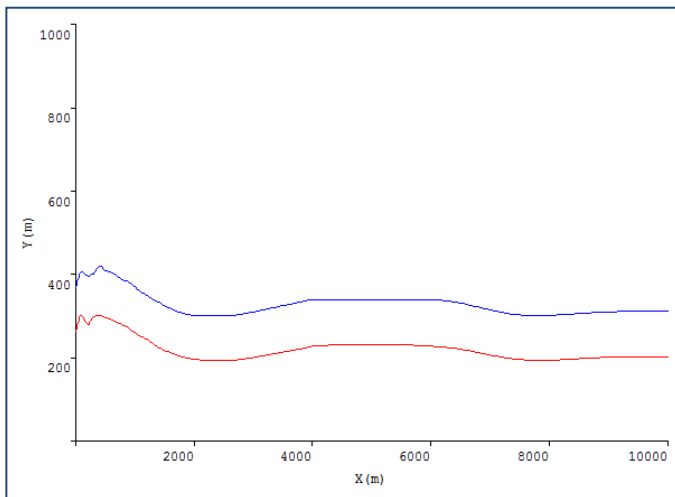


Fig. 5.3.3-a: Línea de costa; 60°, 12 meses. Modelo Q2D-m

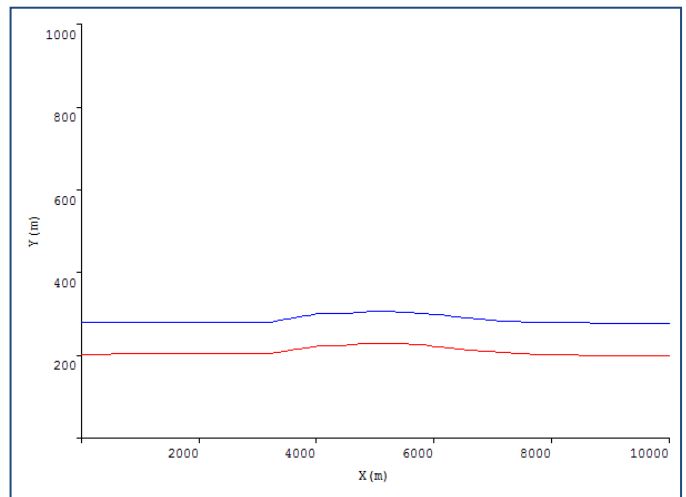


Fig. 5.3.3-b: Línea de costa; 60°, 12 meses. Modelo Snell

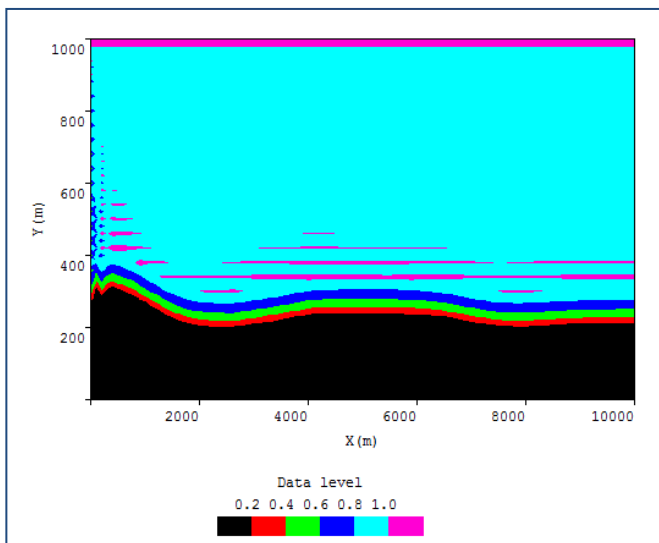


Fig. 5.3.3-c: Alturas de ola; 60°, 12 meses. Modelo Q2D-m

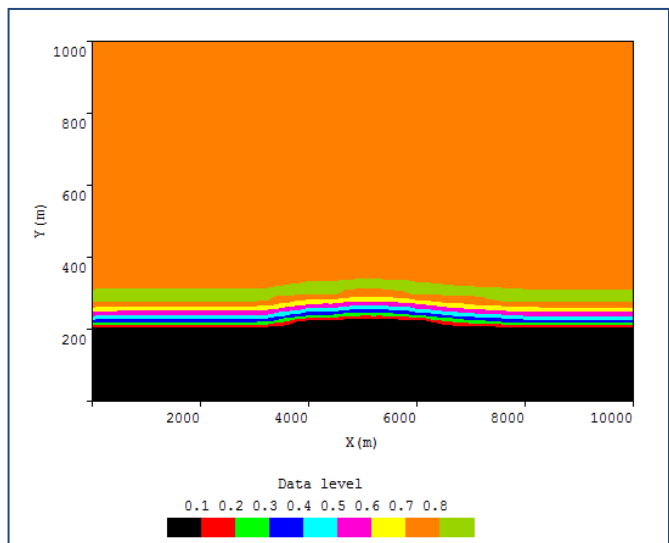


Fig. 5.3.3-d: Alturas de ola; 60°, 12 meses. Modelo Snell

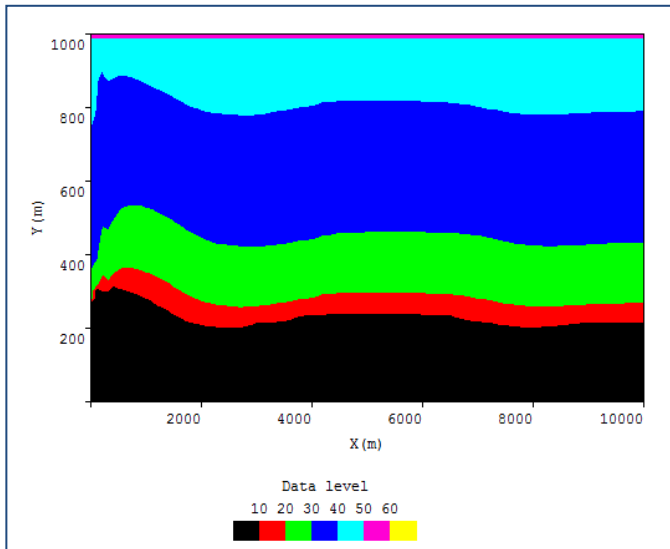


Fig. 5.3.3-e: Ángulos; 60°, 12 meses. Modelo Q2D-morfo

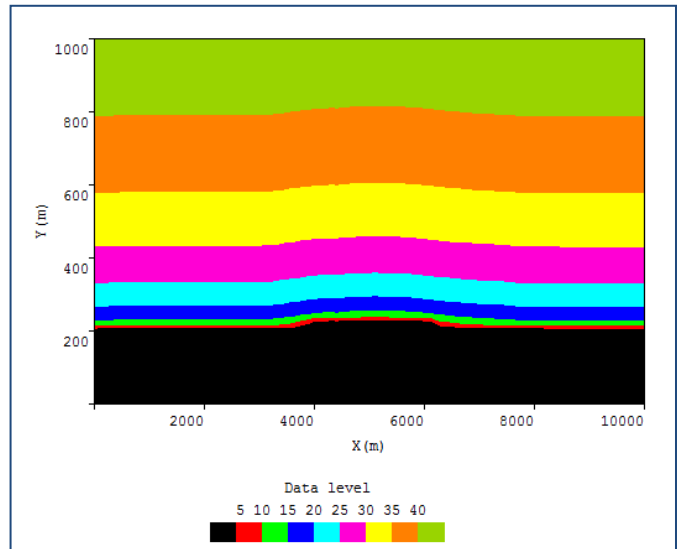


Fig. 5.3.3-f: Ángulos; 60°, 12 meses. Modelo Snell

5.3.4. Ensayo “*Nourishment*”, $\theta_0=80^\circ$

Situación de la costa medida tras un período de 3 meses y 15 días.

El modelo Snell presenta la difusión de la perturbación de forma homogénea.

El modelo Q2D-morfo, por otro lado, perfila y exagera su forma. Este fenómeno indica la presencia de inestabilidades en la costa, que incrementan el efecto de cualquier pequeña perturbación.

El campo de ángulos mantiene una similitud razonable. Por otro lado, el campo de alturas de ola presenta un grado de variación no despreciable.

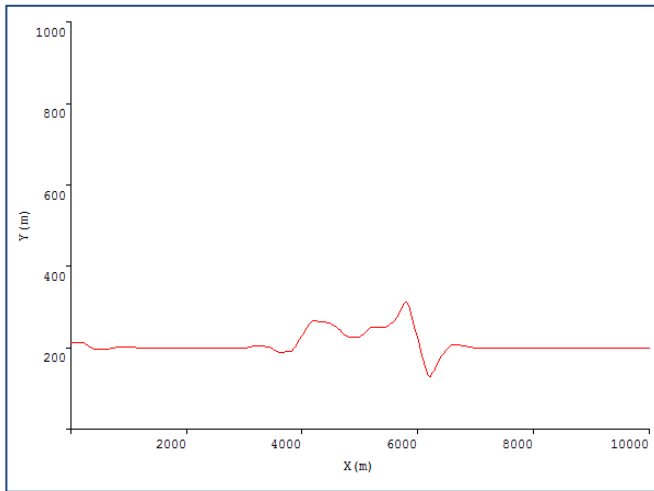


Fig. 5.3.4-a: Línea de costa; 80°, 3.5 meses. Modelo Q2D-m

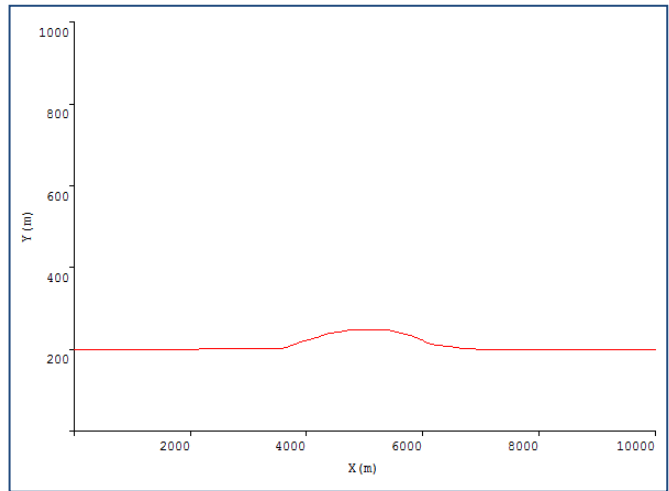


Fig. 5.3.4-b: Línea de costa; 80°, 3.5 meses. Modelo Snell

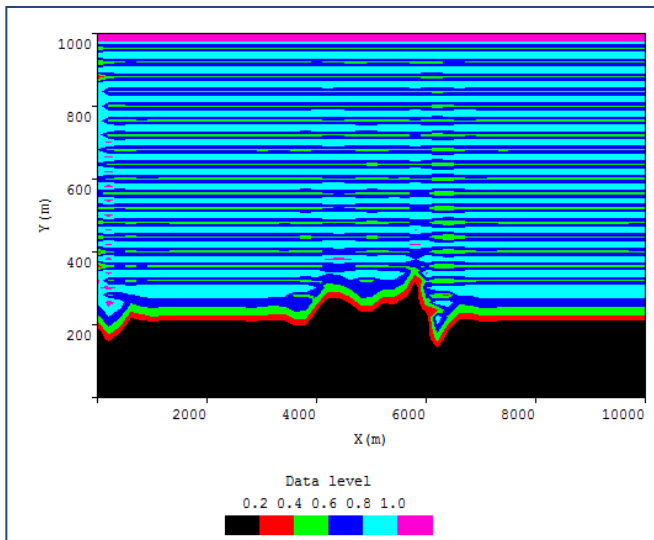


Fig. 5.3.4-c: Alturas de ola; 80°, 3.5 meses. Modelo Q2D-m

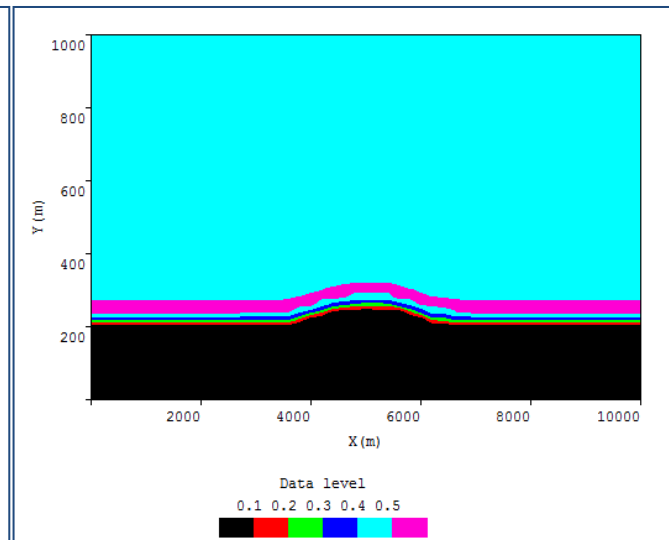


Fig. 5.3.4-d: Alturas de ola; 80°, 3.5 meses. Modelo Snell

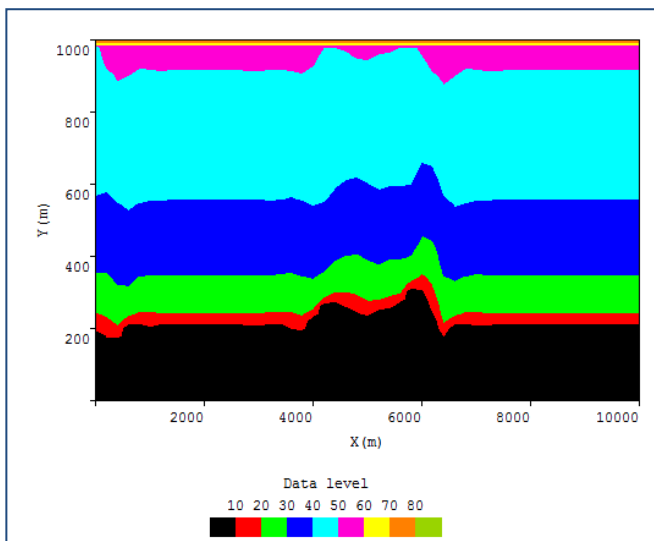


Fig. 5.3.4-e: Ángulos; 80°, 3.5 meses. Modelo Q2D-morfo

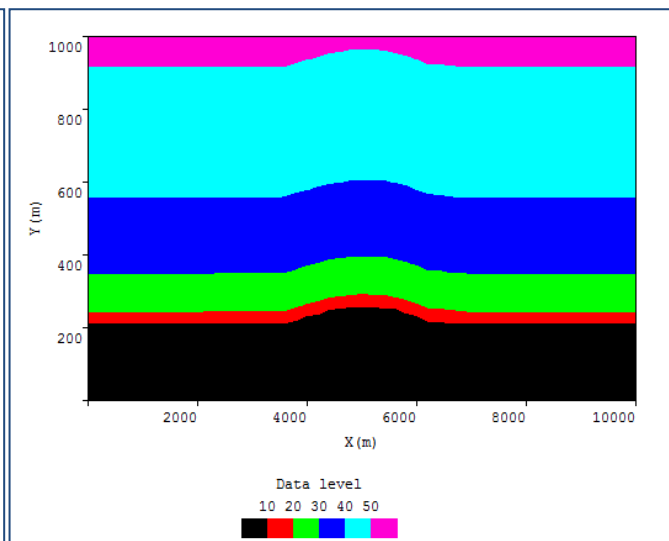


Fig. 5.3.4-f: Ángulos; 80°, 3.5 meses. Modelo Snell

6. Conclusiones

Atendiendo a los resultados obtenidos en los ensayos llevados a cabo, se puede concluir lo siguiente:

La aplicación del modelo Q2D-morfo de *ShorePlot*, para ángulos de incidencia relativamente bajos, presenta un fenómeno de erosión en el extremo de la costa de donde procede el oleaje.

Tal como se indicado ya en los ensayos pertinentes, este fenómeno es debido a la acumulación sucesiva de un efecto diferencial, producto de la consideración de estabilidad en dicho extremo. En otras palabras, la consideración de que en el límite lateral pueda aplicarse el modelo Snell para obtener el resto de la propagación del oleaje, provoca una diferencia en H_b entre este punto y el siguiente/anterior (dependiendo del extremo).

Para valores bajos del ángulo de incidencia, esto tiene un efecto relativo importante en la expresión del caudal de sedimento:

$$Q_i = \mu \cdot H_b^{5/2} \cdot \sin(2 \cdot (\theta_b - \varphi_i))$$

Ec. 6-I: Caudal de sedimento. Fuente [1], pág. 331

De este modo, y puesto que el valor de H_b obtenido en el extremo es inferior, se genera un diferencial no despreciable de Q que termina por degenerar en una erosión artificial de dicho extremo.

Una posible solución a este fenómeno pasaría por considerar la condición de contorno en un punto más alejado de la malla, y proceder por medio de un sistema de aproximación como el empleado en los límites amortiguados.

Por otro lado, se observa que el modelo Q2D-morfo es capaz de reconocer y representar el fenómeno físico de las inestabilidades; mientras que el modelo Snell no lo hace.

Este fenómeno aparece para valores de ángulo incidente suficientemente grandes, y provoca una pronunciación progresiva de cualquier pequeña irregularidad en la línea de costa.

Del mismo modo, y puesto que la presencia de espigones provoca una acumulación artificial de sedimento, es habitual que el modelo Q2D-morfo reaccione ante dicho fenómeno generando un punto localizado de inestabilidad, sin necesidad de ángulos especialmente grandes.

Esto, sin embargo, hace del modelo Q2D-morfo un sistema delicado, puesto que adquiere tendencia a depender de valores que no existen.

Póngase, por ejemplo, el caso de una acumulación puntual de sedimento. Los puntos adyacentes al mismo dependerán de la altura de oleaje y de la profundidad (entre otros) en un punto de la malla en que dichos valores no existen o valen cero; fenómeno que puede dar pie a errores y/o singularidades.

A modo de conclusión, queda patente que el modelo Q2D-morfo (dejando de lado el fenómeno de erosión que se presenta en el extremo) representa la situación evolutiva de una manera más amplia y fiable, ya que contempla la situación completa de la zona en su propagación del oleaje y representa el fenómeno de inestabilidad.

Teniendo en cuenta que el modelo Snell consume menos recursos que el Q2D-morfo, sin embargo, se concluye también que este primer modelo resulta suficientemente adecuado para valores de ángulo incidente relativamente bajos, ya que las inestabilidades no se producen en estas situaciones.

En caso de considerar la presencia de espigones, y por los motivos ya citados, podría ser recomendable la ejecución y comparación específica los resultados de ambos procedimientos.

7. Ilustraciones

A continuación, se incluye una pequeña selección de imágenes de diferentes playas del globo, obtenidas por medio del software *Google Earth*.

Estas imágenes recogen un fenómeno de ondulación de la línea de costa en presencia de oleajes con ángulos de incidencia grandes.

Estudios recientes apuntan a que este tipo de formas podrían deber su aparición al fenómeno de inestabilidad. Esto queda recogido en el artículo citado en la fuente [15].

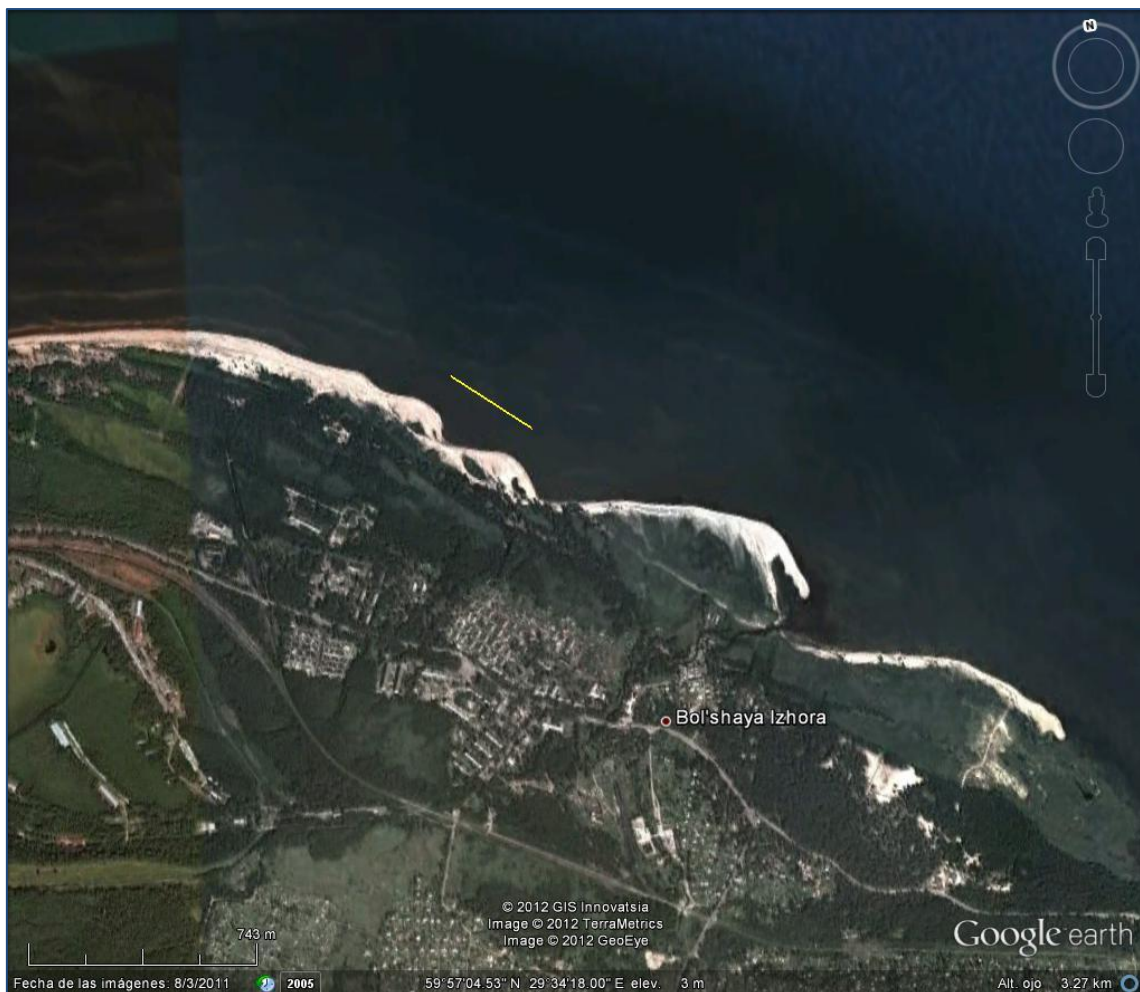


Fig. 7-a: Costa de Finlandia



Fig. 7-b: Costa de Namibia



Fig. 7-c: Costa de Angola

8. Referencias bibliográficas

- [1] Dean, Robert G. & Dalrymple, Robert A. *Coastal Processes with Engineering Applications*. 2001
- [2] Jiménez, José A. *Cross-shore Sediment Transport*. 2014 (*Enginyeria Marítima i Portuària*. Grau en Enginyeria Civil. UPC)
- [3] Falqués, Albert. *Q2D-morfo: A morphodynamic quasi-2DH coastline model*. 2006
- [4] Jiménez, José A. *Interacción Puerto-Costa*. 2014 (*Enginyeria Marítima i Portuària*. Grau en Enginyeria Civil. UPC)
- [5] Salford Software. *ClearWin+ Manual (Fortran Edition)*. 2000
- [6] BUSS Ltd. *SIMPLEPLOT Primer*. 2000
- [7] BUSS Ltd. *SIMPLEPLOT 3-D*. 2000
- [8] Silverfrost. *Silverfrost forums* [Consulta: 2014-2015] Disponible en: <http://forums.silverfrost.com/>
- [9] NSC at Linköping University. *Fortran 90 for the Fortran 77 Programmer*. [Consulta: 2015] Disponible en: <https://www.nsc.liu.se/~boein/f77to90/>
- [10] Michigan Technological University. *Fortran Intrinsic Functions*. [Consulta: 2015] Disponible en: <http://www.cs.mtu.edu/~shene/COURSES/cs201/NOTES/chap02/funct.html>
- [11] Van Mourik, Tanja. *Fortran 90/95 Programming Manual - fifth revision*. 2005
- [12] Serra, Joan Pau. *Propagació de l'onatge*. 2013 (*Enginyeria Marítima i Portuària*. Grau en Enginyeria Civil. UPC)
- [13] Süli, Endre; Mayers, David & Kraus, Nicholas C. *An Introduction to Numerical Analysis*. 2003
- [14] Larson, Magnus & Hanson, Hans. *Analytical Solutions of the one-line model of Shoreline Change*. 1987
- [15] Van den Berg, N.; Falqués, A. & Ribas, F. *Modeling large scale shoreline sand waves under oblique wave incidence*. 2012